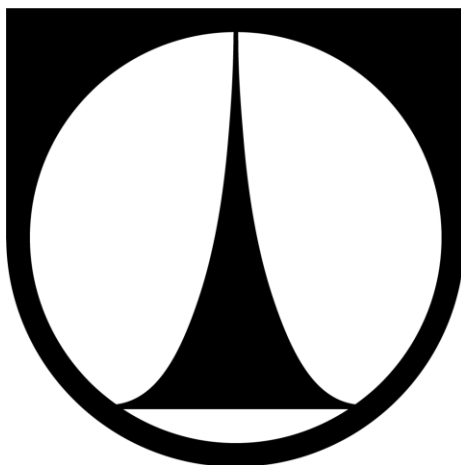


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra strojírenské technologie



Určení vlivu použitého měřícího zařízení na hodnoty modulu pružnosti v tahu

Assessment of influence of used measuring device on Young's modulus values.

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

David Šubrt

Datum: 24. 5. 2013

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program B2341 - Strojírenství

Materiály a technologie
Zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

Určení vlivu použitého měřicího zařízení na hodnoty modulu pružnosti v tahu

Assessment of influence of used measuring device on Young's modulus values.

David Šubrt

KSP – TP –

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D

Konzultant bakalářské práce: Ing. Michaela Kolnerová, Ph.D.

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 49

Počet obrázků: 21

Počet příloh: 4

Počet tabulek: 8

Datum: 24. 5. 2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení	David Š U B R T
Studijní program	B2341 Strojírenství
Studijní obor	3911R018 Materiály a technologie
Zaměření	Tváření kovů a plastů

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje bakalářské práce na téma:

Určení vlivu použitého měřicího zařízení na hodnoty modulu pružnosti v tahu

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Základní charakteristika hlubokotažných ocelí.
2. Charakteristika modulu pružnosti v tahu a jeho základní význam v technické praxi.
3. Seznámení se s problematikou hodnocení modulu pružnosti kovových materiálů pomocí různých metod.
4. Experimentální určení vlivu použitého měřicího zařízení na hodnoty modulu pružnosti v tahu pro hlubokotažný materiál.
5. Vyhodnocení naměřených výsledků.
6. Závěr.



Forma zpracování bakalářské práce:

- průvodní zpráva: v rozsahu cca 30 stran

- přílohy: grafy, tabulky

Seznam literatury (uveďte doporučenou odbornou literaturu):

- [1] BŘEZINA, R. *Úvod do tváření II* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2002 ISBN 80-248-0068-3.
- [2] EN ISO 6892-1: Kovové materiály. Zkoušení tahem. Část 1. Zkoušení za okolní teploty, 2010
- [3] VELES, P. *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov*. Bratislava: Alfa, 1989
- [4] KUHN, H. *ASM Handbook: Volume 8: Mechanical Testing and Evaluation (Asm Handbook) (Asm Handbook) (Asm Handbook)*. 10. vyd. Ed. Howard Kuhn a Dana Medlin. [s.l.]: ASM International, 2000 998 s. ISBN 0871703890.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce: Ing. Michaela Kolnerová, Ph.D.

L. S.

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
vedoucí katedry

doc. Ing. Miroslav Malý, CSc.
děkan

V Liberci dne 9. 5. 2013

Platnost zadání bakalářské práce je 15 měsíců od výše uvedeného data. (v uvedené lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ). Termíny odevzdání bakalářské práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program: B2341 – Strojírenství
Student: David Šubrt
Téma práce: Určení vlivu použitého měřicího zařízení na hodnoty modulu pružnosti v tahu

Assessment of influence of used measuring device on Young's modulus values.

Číslo BP: KSP – TP –
Vedoucí BP: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.
Konzultant: Ing. Michaela Kolnerová, Ph.D.

Abstrakt:

Cílem této bakalářské práce je zjištění vlivu použitých měřidel při určování modulu pružnosti tahovou zkouškou. Dále tato práce zjišťuje vliv rozdílného způsobu zpracování výsledků, na konečné hodnoty modulu pružnosti v tahu. Naměřené hodnoty jsou vyhodnoceny třemi různými způsoby a podrobeny statistickému testu shody střední hodnoty, pro ověření vlivu měřidel.

Abstract:

The goal of this bachelor thesis is the assessment of influence of used measuring device on Young's modulus measuring by using the tensile test. Further the thesis determinates affect of different ways of results processing on final young's modulus values. Measured values are analysed three ways and put through statistical test for checking on influence of measuring instruments.

Poděkování

V první řadě bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlu Solfronkovi, Ph.D. za odbornou konzultaci a pomoc při měření a konzultantce Ing. Michaele Kolnerové, Ph.D. Dále děkuji Ing. Jiřímu Sobotkovi Ph.D. za odborné rady při práci s programem Origin Pro 8, Janu Šubrtovi za pomoc při překladu anglických textů, Kristýně Schwarzové za korekci textu a své rodině za podporu při studiu.

Seznam symbolů a jednotek

Značení	Název	Jednotka
A_5, A_{10}	tažnost	[%]
b	šířka materiálu	[mm]
BH	Bake Hardening	[-]
d	průměr	[mm]
E	modul pružnosti v tahu	[MPa]
F	zatěžovací síla	[N]
F_{\max}	Maximální zatěžovací síla	[N]
G	modul pružnosti ve smyku	[MPa]
h	tloušťka materiálu	[mm]
IT	index tvárnosti	[-]
IF	intersticial free	[-]
J	moment setrvačnosti	[m ²]
$k_{1,2}$	stupeň volnosti	[-]
KUT	kompletní index tvárnosti	[-]
l	vzdálenost podpěr	[mm]
ΔL	absolutní prodloužení	[mm]
L_0	počáteční měřená délka	[mm]
L_u	konečná měřená délka	[mm]
M_k	kroutící moment	[Nm]
M_o	ohybový moment	[Nm]
$M_{o \max}$	Maximální ohybový moment	[Nm]
r	koeficient normálové anizotropie	[-]
R_{mo}	pevnost v ohybu	[MPa]
R	napětí	[MPa]
R_u	mez úměrnosti	[MPa]
R_p	mez pružnosti	[MPa]
$R_{p0,005}$	Smluvní mez pružnosti	[MPa]
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu	[MPa]
R_e	mez kluzu	[MPa]
R_{eH}	horní mez kluzu	[MPa]

R_m	mez pevnosti v tahu	[MPa]
S_0	počáteční plocha průřezu	[mm ²]
S_u	plocha průřezu při přetržení	[mm ²]
$s^2_{1,2}$	výběrový rozptyl	[-]
$t_{(1-\frac{\alpha}{2}; k_{1,2})}$	testovací kritérium	[-]
W_0	průřezový modul v ohybu	[mm ³]
\bar{x}, \bar{y}	výběrová střední hodnota	[-]
y	průhyb	[mm]
z_{\max}	vzdálenost okrajového vlákna od neutrální osy	[m]
Z	kontrakce	[%]
α	hladina významnosti	[%]
ε	poměrné prodloužení	[-]
σ	normálové napětí	[MPa]
φ	průhyb	[rad]

Obsah

1. Úvod	8
2. Teoretická část	9
2.1 Hlubokotažné oceli	9
2.1.1 Chemické složení	11
2.1.2 Zástupci hlubokotažných ocelí	12
2.1.2.1 IF ocele bez intersticií	13
2.1.2.2 IF ocele tvrzené BH efektem	13
2.2 Zkoušky kovů a jejich základní vlastnosti	15
2.2.1 Zkoušení kovů	15
2.2.1.1 Zkouška tahem	17
2.2.1.2 Zkouška ohybem	20
2.3 Modul pružnosti	21
2.3.1 Staticky určený modul pružnosti	22
2.3.2 Dynamicky určený modul pružnosti	24
3. Experimentální část	26
3.1 Zkoušený materiál	27
3.2 Zkušební vzorek	27
3.3 Průběh zkoušky	28
3.4 Zpracování naměřených hodnot	32
3.4.1 Stanovení modulu pružnosti přímou metodou z Labtestu	32
3.4.2 Stanovení modulu pružnosti směrnici přímky	35
3.4.3 Stanovení modulu pružnosti derivací přímky	37
4. Vyhodnocení výsledků zkoušky	42
4.1 Vyhodnocení výsledků získaných směrnici přímky	43
4.2 Vyhodnocení výsledků získaných derivováním přímky	44
4.3 Vyhodnocení výsledků statistické metody	45
5. ZÁVĚR	46
6. Seznam použité literatury	48
7. Seznam příloh	49

1. Úvod

K návrhu strojní součásti je potřeba vědět, v kterém prostředí a za jakých okolností bude používána. Tyto informace jsou důležité pro maximální životnost navrhované součásti při použití v praxi. Z poznatků o použití je možno stanovit charakter namáhání takového výrobku, které lze simulovat mechanickými zkouškami. Tyto zkoušky jsou velice důležité pro určení a popis prakticky všech materiálových charakteristik, mezi které patří například modul pružnosti. Tyto hodnoty se dále kvantifikují a normují. Podle normy, popisující určitý materiál, si konstruktér může efektivně zvolit takový materiál, který bude odpovídat zhotoveným pevnostním výpočtům podle předběžně zjištěného namáhání výrobku.

Bakalářská práce se bude zabývat určováním modulu pružnosti statickou metodou, reprezentovat ji bude statická tahová zkouška. Cílem této práce je zjistit vliv použitých měřidel na určování modulu pružnosti v tahu, k dispozici budou dva typy průtahoměrů s rozdílnými sadami počátečních délek a dva typy tenzometrických hlav s rozdílným maximálním rozsahem.

Teoretická část bakalářské práce bude nejprve seznamovat s velmi využívanými zástupci materiálů, hlubokotažnými ocelmi, jejímž zástupcem je měřený materiál. Rozebere se zde jejich chemické složení, vlastnosti a nejčastěji používání zástupci v automobilovém průmyslu. Dále bude teoretická část popisovat základní vlastnosti kovů, zkoušky kovů a jejich zástupce. Následně vysvětlí pojem modul pružnosti a představí metody jeho určení a to jak statické tak i dynamické.

Experimentální část bude seznamovat se samotným způsobem měření, dále se zkoušeným materiálem a jeho vlastnostmi. Budou zde naměřeny hodnoty modulu pružnosti různými kombinacemi počátečních délek, snímačů síly a délky. Výsledky dále budou zpracovány a vyhodnoceny třemi různými metodami. Zhodnocení vlivu měřidel na výsledné hodnoty bude podloženo statistickým testem shody střední hodnoty.

2. Teoretická část

V teoretické části bakalářské práce bude popsána základní charakteristika hlubokotažných ocelí, vlastnosti kovů a jejich zkoušení, dále zde bude charakterizován modul pružnosti v tahu a seznámení s problematikou hodnocení modulu pružnosti kovových materiálů, pomocí různých metod.

2.1 Hlubokotažné oceli

Tyto materiály se vyznačují poměrně vysokou pevností a hlavně výbornou tvářitelností při složitých tvarech. Jejich využití ve strojírenství je velmi široké, ale největší uplatnění nachází v automobilovém průmyslu, kde se používají při složitých výliscích karosérií. Nároky na tyto materiály se s dobou stále zvyšují, proto je třeba zlepšovat jejich požadované vlastnosti, jako je tvárnost, zkoumáním technologického vývoje zpracovatelnosti a vyvíjet lepší, kvalitnější fyzikálně-metalurgické procesy. Důležité je dosahovat co nejmenšího obsahu legujících prvků, negativně ovlivňujících mechanické vlastnosti této ocele. [1]

V rámci pokročilého vývoje v automobilovém průmyslu bylo vyvinuto dokonalejší značení vlastností těchto ocelí. Důvodem je globální výroba automobilových komponentů s použitím CAD a CAFA systémů, programy pro konstrukci a analýzu tváření. Z důvodu efektivity systémů, je třeba znát podrobné mechanické vlastnosti již v začátcích návrhu konstrukčního dílu. Touto myšlenkou se nechala inspirovat asociace automobilových inženýrů SAE (Society of Automotive Engineers), přičemž v roce 1997 ratifikovala specifikaci J2329 s názvem „Kategorie a vlastnosti nízkouhlíkových automobilových ocelových plechů“. Zástupci jsou uvedeny v příložené tabulce 2.1. [1]

Tyto zástupce dále reprezentují ocele VSŽ řady KOHAL, jejichž materiálové vlastnosti, editovány podle jiné mezinárodní normy, jsou uvedeny v tabulce 2.2.

Podle mechanických vlastností, chemického složení, způsobu zpracování jsou hlubokotažné ocele rozřazeny do určitých jakostních skupin:

- | | | |
|------|-----|--|
| I. | CQ | - plechy běžné kvality (Comercial Quality) |
| II. | DQ | - tažné plechy (Drawing Quality) |
| III. | DDQ | - hlubokotažné plechy (Deep Drawing Quality) |

- IV. EDDQ - zvlášť hlubokotažné plechy (Extra Deep Drawing Quality)
- V. EDDQ-S - super hlubokotažné plechy (Extra Deep Drawing quality–Super)

Tyto ocele a jejich kompletní přehled vlastností, je uveden v tabulce 2.3. [2]

Tab. 2.1 Dle normy SAE J2329 stanovené mechanické vlastností za studena válcovaných plechů [1]

Označení: SAE J2329	Mez kluzu: $R_{p0,2}$ [MPa]	Minimální pevnost [MPa]	Tažnost A: [%]	r min.	n min.
Stupeň 1	-	-	-	-	-
Stupeň 2	140 - 260	240	34	-	0,16
Stupeň 3	140 - 205	240	38	1,5	0,16
Stupeň 4	140 - 185	240	40	1,6	0,20
Stupeň 5	110 - 170	240	42	1,7	0,22

Tab. 2.2 Plechy řady KOHAL, za studena válcované [1]

Označení jakosti	$R_{p0,2}$ min. [MPa]	$R_{p0,2}$ max. [MPa]	R_m [MPa]	A min. [%]	Ohyb o 180°	r min.	n min.
KOHAL 180	140	180	270 - 330	40	0 a	1,9	0,200
KOHAL 200	140	200	270 - 350	38	0 a	1,6	0,180
KOHAL 240	140	240	270 - 370	34	0 a	1,3	-
KOHAL 280	140	280	270 - 410	28	0 a	-	-

Tab. 2.3 Charakteristické vlastnosti oceli rozdělené dle jakostních skupin [2]

Skupina	R_e [MPa]	A [%]	r	n	P	KUT	IT
CQ	240 - 260	26 - 30	1,0 - 1,2	0,14 - 0,16	1,2 - 1,3	30 - 40	< 200
DQ	220 - 240	30 - 36	1,2 - 1,4	0,16 - 0,18	1,3 - 1,4	40 - 50	200 - 250
DDQ	200 - 220	36 - 38	1,4 - 1,6	0,18 - 0,20	1,4 - 1,5	50 - 57	250 - 320
EDDQ	180 - 200	38 - 40	1,6 - 1,8	0,20 - 0,22	1,5 - 1,67	57 - 67	320 - 400
EDDQ-S	< 180	> 40	> 1,8	> 0,22	> 1,67	> 57	> 400

P - poměr pevnosti a meze kluzu:
$$P = \frac{R_m}{R_e} \quad (2.1)$$

Kde R_m je mez pevnosti a R_e je mez kluzu daného materiálu.

KUT - komplexní ukazatel tvářitelnosti:
$$KUT = P \cdot A_{10} \quad (2.2)$$

V této rovnici A_{10} reprezentuje tažnost.

IT - index tvářitelnosti:
$$IT = r \cdot n \cdot 100 \quad (2.3)$$

2.1.1 Chemické složení

Hlubokotažná ocel obsahuje kromě uhlíku také mangan, malé procento fosforu, síry, křemíku a plyny dusík a kyslík. Mezi legující prvky obsažené v této oceli patří měď, chrom, nikl, molybden a cín. Tyto legury se do materiálu dostávají ze surového železa a ocelového odpadu. [3]

Hlubokotažné oceli dále obsahují malé množství stabilizačních prvků, mezi které patří titan, hliník, vanad, bór a další. Stabilizační jsou proto, že na sebe vážou dusík, který zamezuje posunu dislokací, a tím prakticky zastavují proces stárnutí, který se projevuje omezením tvárnosti oceli. Dusík je nejvíce škodlivý prvek, jehož obsah se v hlubokotažné oceli pohybuje 0,005 – 0,007 %, nejen že způsobuje stárnutí, dále zvyšuje její tvrdost a křehkost. U uklidněných ocelí je požadavek na obsah uhlíku při výrobě nízký, jeho procento totiž při výrobě neklesá, procentuálně

se tedy pohybuje 0,02 – 0,08 %. Optimální požadované vlastnosti hlubokotažné oceli uklidněné hliníkem, tj. hlubokotažnost, docílujeme při procentuálním obsahu hliníku 0,03 - 0,05 %. [3]

Velkou pozornost z legujících prvků, které ovlivňují mechanické vlastnosti oceli, si zaslouží hlavně křemík, mangan, fosfor a síra. Jelikož mangan zvyšuje pevnost oceli tak, že na sebe váže síru, je třeba, aby obsah síry převyšoval pětinasobně tj. 0,25 – 0,4 %. Křemík se v oceli používá k dezoxidaci, protože ale zvyšuje tvrdost a tím snižuje tvárnost, neměl by překročit hodnotu 0,01%, je nahrazován hliníkem. Obsah fosforu a síry působí v oceli na požadované vlastnosti negativně, proto je považujeme za nežádoucí prvky. Tyto nečistoty velice zhoršují plastické vlastnosti materiálu, přičemž norma dovoluje maximální obsah těchto prvků 0,025 %. [3]

V automobilovém průmyslu se požadavky na tyto materiály stále zvyšují, proto byla relativně nově vyvinuta metoda mikrolegování. Spočívá ve striktně dodržném minimálním množství legur, které zaručují dané mechanické vlastnosti. Konkrétněji u této technologie dochází k precipitačnímu zpevnění, tak že používané legující prvky vytvoří disperzní precipitáty ve struktuře materiálu. K mikrolegování se používá titan, vanad, zirkon a niob. [3]

2.1.2 Zástupci hlubokotažných ocelí

Automobilový průmysl v neposlední řadě požaduje u materiálů dobrou korozní odolnost, která se u hlubokotažných ocelí docíluje povrchovou úpravou. Nejčastěji se tyto plechy pozinkovávají a to dvěma způsoby buď žárově, nebo elektrolyticky. Žárovým zinkováním hlubokotažné plechy z materiálů uklidněných hliníkem degradují stárnutím. Důvodem je vysokoteplotní proces vedoucí ke změně mechanických vlastností. Druhy těchto ocelí nemohou dosáhnout vyšší tvářitelnosti, nežli popisuje skupina DDQ. Pro tyto povrchové úpravy se právě nejčastěji používají IF ocele, důvod je ten, že při vysokých teplotách nedochází ke stárnutí.

2.1.2.1 IF ocele bez intersticií

Mezi hlavní zástupce těchto materiálů patří IF ocele, název pochází z anglického jazyka a je to zkratka (interstitial free), možno přeložit bez intersticií. Z toho vyplývá, že jejich výborná tažnost je dosažena minimálním obsahem intersticiálních atomů, dále také vhodnou velikostí feritických zrn a texturou tvořenou rekrystalizačním žíháním. [3]

Z výše popsané ocele byla vyvinuta, zdokonalením výrobního postupu, ocel s extrémně nízkým obsahem uhlíku bezintersticiální IF ocel, neboli vákuově odplyněná ocel. Vyrábí se za použití kyslíkových konvertorů, umožňujících snížení obsahu dusíku až na hodnotu 0,002 %. Dále snižováním obsahu uhlíku vákuovou rafinací a přesnou kontrolou obsahu uhlíku, dusíku a kyslíku v čase jejich odlévání. [3]

Tyto ocele se vyznačují mezí pružnosti > 175 MPa, výbornou lisovatelností a vysokou tažností $> 40\%$, zapříčiněnou super nízkým obsahem uhlíku v intervalu 0,002 – 0,004 %, dusíku 0,003%, síry 0,002 – 0,004 % a dalšími prvky. Dále k zajištění jejich požadovaných vlastností je třeba vázat, už tak nízkou koncentraci intersticií rozpuštěných v tuhém roztoku v co největší míře na stabilizační precipitáty karbonitridů pomocí mikrolegovacích přísad titanu a niobu. [3]

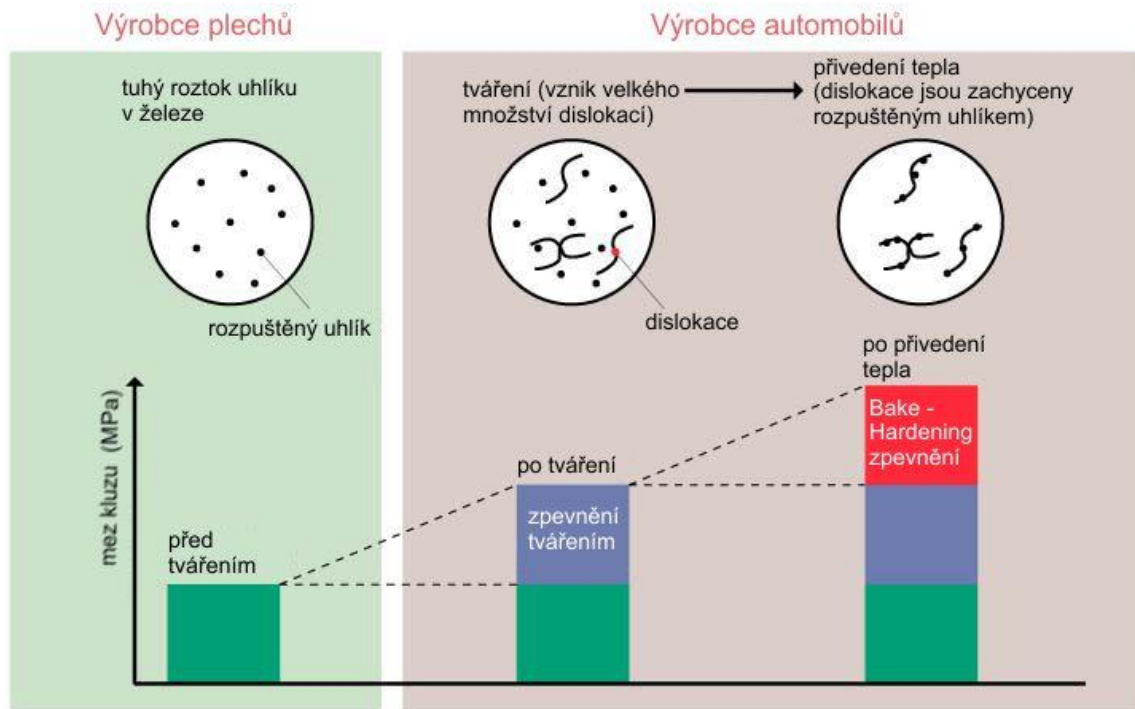
2.1.2.2 IF ocele tvrzené BH efektem

Výhodou IF ocelí s nevýraznou mezí kluzu je jejich tvářitelnost, o to mají menší odpor vůči vtlačení. Automobilový průmysl vyvinul pro tento nedostatek řešení s názvem Bake Hardening efekt, dále jen BH. [1]

Je to proces zvyšující mez kluzu vypalováním laku, naneseným na plechu z IF ocele, při teplotě 170°C v rozmezí 20 minut. Obrázek 2.1 slouží pro lepší představu při aplikaci BH procesu. Efektivita tohoto zpevnění se odvíjí od chemického složení, konkrétněji od obsahu C, S a Mn. Na efektivitu BH má dále vliv tváření za studena a následující rekrystalizační žíhání. [1]

Mez kluzu lze tímto procesem zvýšit o 40 – 70 MPa, tím tedy i odolnost automobilových karosérií proti vtlačení. Pro zpracování ocelových plechů v doprovodu BH efektu se používají dva druhy ocelí, jsou to ocele s navýšeným procentem C a navýšeným procentem Nb, nebo Ti. [1]

Bake-hardening Proces



Obr. 2.1.1 Chování IF ocele při aplikaci BH efektu [4]

1) IF ocel s navýšeným obsahem C

Legury Ti a Nb jsou do tohoto materiálu přidávány méně, je totiž třeba, aby po válcování za tepla ještě určitá část C v tuhém roztoku zůstala. Díky tomu je možno docílit BH efektu za nižších žíhacích teplot. Plechy s navýšeným obsahem C mají v tuhém roztoku určité množství nevázaného uhlíku, to snižuje koeficient normálové anizotropie r , což má za důsledek nižší schopnost dosáhnout vysoké hlubokotažnosti jako u předchozích IF ocelí. [1]

2) IF ocele s navýšeným obsahem Nb, nebo Ti

U této IF ocele je dosahováno vysoké hlubokotažnosti z důvodu minimálního výskytu intersticiálního uhlíku v tuhém roztoku při tváření, po němž je třeba žíhat za vysokých teplot. Z karbonitridických precipitátů rozpuštěných při vysokoteplotním žíhání se získá potřebný uhlík, který se dále váže na dislokace a tím vytvoří pevnější strukturu. Po vysokoteplotním žíhání, prováděném na kontinuálních linkách, následuje rychlé ochlazení, přičemž rychlost ochlazení

a výše žíhací teploty ovlivňuje efektivnost BH efektu. Tyto IF ocele z hlediska zpracování v rámci ekonomičnosti jsou oproti předchozím náročnější. [1]

IF ocele tvrzené BH efektem jsou používány hlavně na povrchové díly automobilů, jako jsou kapoty, blatníky, dveře atd...

2.2 Zkoušky kovů a jejich základní vlastnosti

Vlastnosti kovů jsou velice rozmanité, závisí na chemickém složení, struktuře a v neposlední řadě i na způsobu jejich zpracování. Tyto způsoby se neustále zdokonalují, vyvíjí a tím zvyšují kvalitu materiálů a jejich ekonomičnost zpracování.

Dělení základních vlastností kovů:

Fyzikální vlastnosti - jsou dány stavbou atomu určující kovové vazby. Právě ty udávají chování materiálu při fyzikálních změnách, mezi které řadíme například měrnou hmotnost, objemovou roztažnost, stlačitelnost, teplotu tání, měrné teplo, elektrickou vodivost, tepelnou vodivost, magnetické vlastnosti a další. [5]

Chemické vlastnosti - určují odezvu materiálu na vlivy chemického působení jako je koroze atd...

Mechanické vlastnosti – určují odezvu materiálu na mechanické namáhání, působení vnějších sil. Mezi tyto vlastnosti řadíme pružnost, pevnost, houževnatost a plasticitu. [5]

Technologické vlastnosti - udávají chování materiálu při určitém technologickém postu zpracování. Takto můžeme materiálové vlastnosti rozmanitě ovlivňovat a přizpůsobovat daným požadavkům, největší význam při jejich zpracování mají slévatelnost, tvárnost, obrobiteľnosť a svařitelnost. [5]

2.2.1 Zkoušení kovů

Ke zkoušení vzorku potřebujeme znát všechny parametry daného materiálu například třídu oceli, způsob jeho zpracování atd. Všechny tyto vlastnosti se dále odrážejí na průběhu zkoušky a její vyhodnocení.

Podle zjišťovaných parametrů můžeme provádět tyto zkoušky:

- Fyzikální
- Chemické
- Fyzikálně-chemické
- Mechanické
- Strukturní
- Technologické
- Defektoskopické

Zkoušky mechanické

Podstatou mechanických zkoušek je definovat srovnatelné hodnoty zkušebních vzorků při striktně vyvozených mechanických podmínkách. Tyto hodnoty jsou pak dále využívány při konstrukčních výpočtech součástí, a proto je třeba apelovat na jejich preciznost, která je zajištěna normalizací. Ta nám dělí zkoušky podle způsobu působení síly na zkoušený vzorek s předepsanými rozměry a dělí je tedy na zkoušky statické, dynamické a cyklické. [6]

Statická zkouška – Zkoušený vzorek je plynule zatěžován zvětšující se silou do doby, kdy v materiálu dochází k trvalým změnám struktury a končí jeho porušením. Nazývají se také destruktivní. [6]

Zkoušky statické se dělí dle smyslu působení síly na vzorek:

- Zkouška tahem
- Zkouška tlakem
- Zkouška ohybem
- Zkouška krutem
- Zkouška stříhem

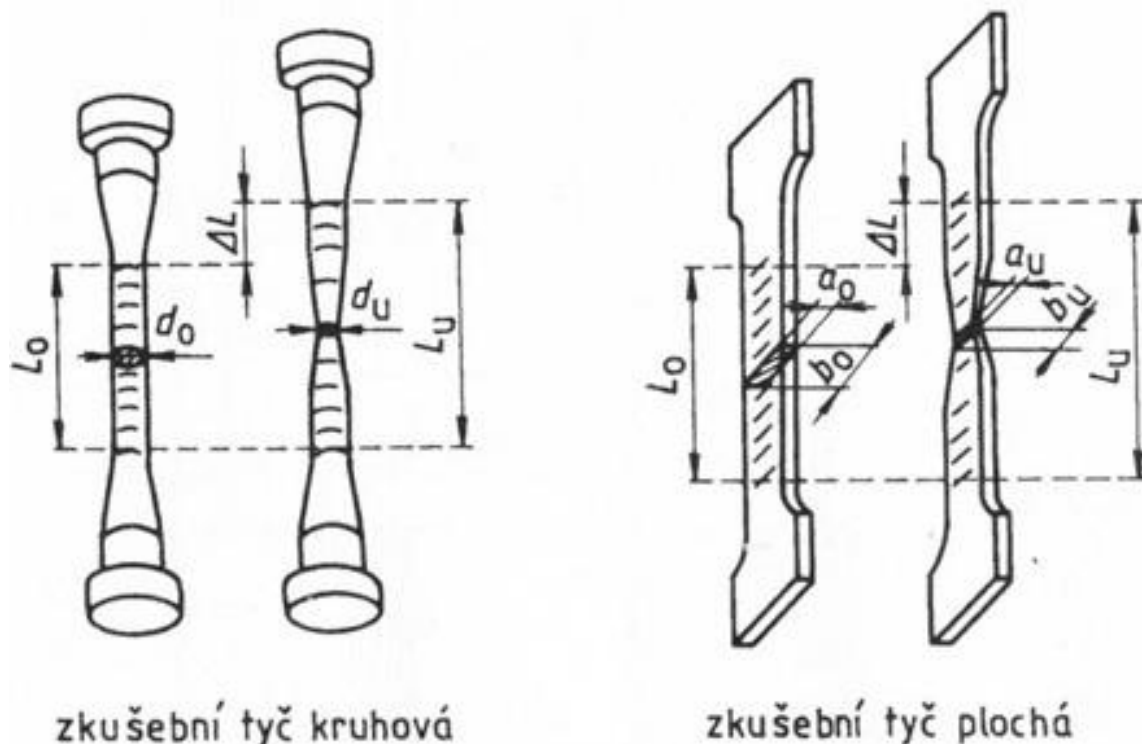
Dynamické a cyklické zkoušky – Rázovou silou, v případě dynamické zkoušky, působíme na zkoušený vzorek s normovanými rozměry, v případě cyklické, působíme zatěžující silou, střídající klidem tak dlouho, dokud se na povrchu vzorku nezačnou objevovat trhlinky. Ve výsledku je důležité vyhodnotit počet takovýchto zatěžujících cyklů s charakterem zatěžující síly do doby, kdy dojde k narušení. Jejich

další rozdělení se orientuje podle teploty, zkouška za nízké, normální a zvýšené teploty. [6]

2.2.1.1 Zkouška tahem

Modul pružnosti materiálu se nejčastěji zjišťuje právě touto statickou zkouškou, kterou popisuje norma ČSN EN ISO 6892-1, je prakticky nejrozšířenější. Zkoušený vzorek tvaru tyčky je tahově zatěžován silou rostoucí předepsanou rychlostí, při čemž dochází k materiálovým změnám vedoucím k roztržení vzorku. Konstantně rostoucí síla generovaná trhačím strojem narůstá úměrně s jednoosým tahem. Ve výsledku jsou zjišťovány mechanické změny materiálu při vyvození jednoosého tahu. [1]

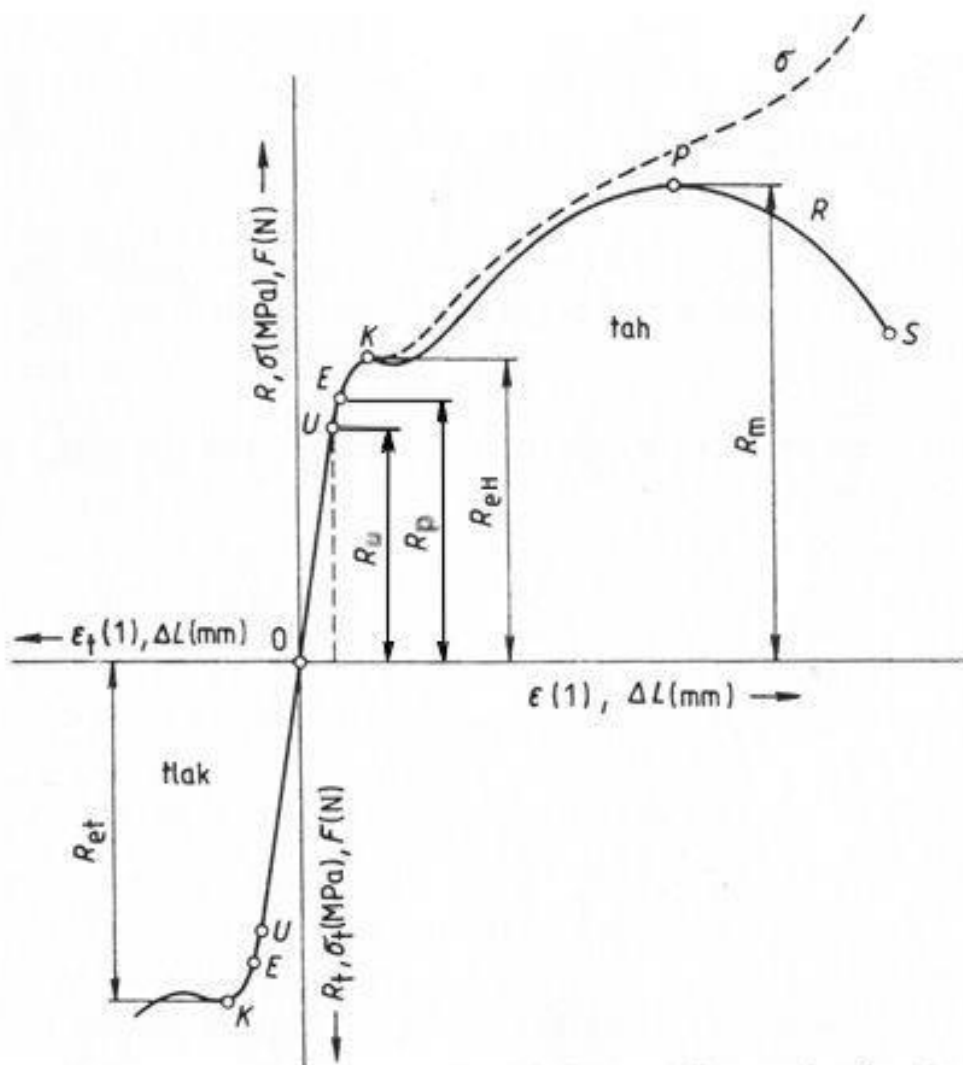
Zkoušený materiálový vzorek popsany normou ČSN EN ISO 6892-1 může mít průřez tvaru kruhového nebo obdélníkového charakteru, znázorněny na obrázku 2.2.



Obr. 2.2 zkušební vzorky tahové zkoušky [7]

Působí-li trhač stroj na zkušební tyčku zvětšující se tahovou silou, dochází ke vzniku napětí a k tvarovým změnám vzorku, u nichž platí zákon zachování objemu do překročení meze pevnosti. S protahující délkou zkušební tyče se zákonitě zužuje její průměr. Toto přetvoření materiálu z původních rozměrů L_0 a d_0 probíhá tak dlouho, dokud se tyčka nepřetrhne, po té jsou její rozměry L_u a d_u , znázorněno výše na obrázku 2.2. [6]

Z těchto rozměrů po vykonání zkoušky lze zjistit poměrné prodloužení ε , ale i například průtahoměrem měřené absolutní prodloužení ΔL . Výsledkem tahové zkoušky je pracovní diagram (obr. 2.3) sledující závislost smluvního napětí na poměrném prodloužení, nebo závislost síly na prodloužení tyče.



Obr. 2.3 Tahový diagram [7]

Z pracovního diagramu tahové zkoušky lze zjistit důležité mechanické parametry zkoušeného kovu, mezi které patří:

- **Mez úměrnosti R_u** – Značí napětí, při kterém ještě lze použít Hookův zákon říkající, že napětí je přímo úměrné prodloužení. Při překročení této meze nelze se vztahem $\sigma = E \cdot \varepsilon$ počítat. E značíme Youngův modul pružnosti.

- **Mez pružnosti R_p** – Značí nejvyšší možné napětí, při kterém dosahujeme pouze pružné deformace a je téměř totožná s mezí úměrnosti R_u . Tuto mez je technicky velice obtížné stanovit, proto se používá smluvní mez pružnosti značící $R_{p0,005}$. [8]
- **Mez kluzu R_{eH}** – Je horní mezní napětí, při kterém ve zkoušeném vzorku dochází k prvním plastickým deformacím, kdy se tyč prodlužuje a napětí zůstává stále stejné. Napětí se může i snížit z důvodu poklesu schopnosti materiálu odolávat mechanickým napětím. V praxi, určujeme smluvní hodnotu $R_{p0,2}$, která odpovídá hodnotě plastické deformace 0,2 L_0 původní délky. [8]
- **Mez pevnosti R_m** – Jak už název napovídá, je to maximální hodnota napětí, při níž ještě nedochází k porušení materiálu. U vzorku se začne projevovat značné zúžení průřezu materiálu, tento jev nazýváme Krček, po kterém dochází k přetržení vzorku v doprovodu s klesajícím napětím. [1]

Vztahy pro vyhodnocení hlavních parametrů tahové zkoušky:

Mez pevnosti:
$$R_m = \frac{F_{\max}}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (2.4)$$

Mez kluzu:
$$R_e = \frac{F}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (2.5)$$

Tažnost: Je dána celkovým prodloužením ($L_u - L_0$) po přetržení ku počáteční délce tyče v procentech:

$$A_i = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.6)$$

K tažnosti je připisován index i např.: A_5 , A_{10} , který charakterizuje velikost průřezu tyče.

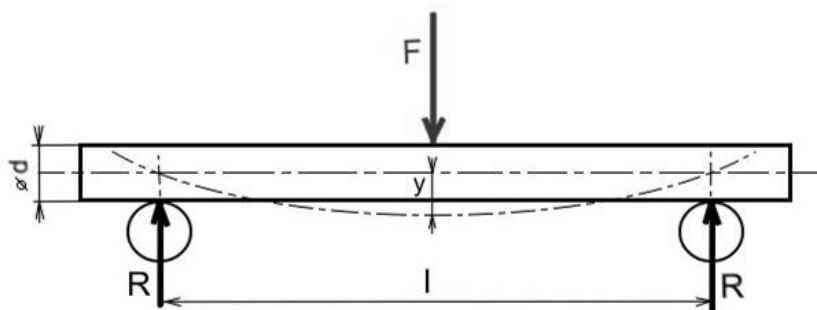
Kontrakce: Je dána celkovým zúžení průměru ($S_0 - S_u$) po přetržení ku počátečnímu průřezu před začátkem namáhání S_0 v procentech:

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.7)$$

Druh ocelí má veliký vliv na tvar pracovního diagramu tahové zkoušky. Například měkké oceli budou vykazovat výraznou mez kluzu, hlubokotažné oceli zase mají velkou zásobu plasticity, což se projeví na tvaru křivky tak, že křivka déle setrvá na hodnotě nejvyššího napětí. Některé materiály jsou bez výrazné meze kluzu, jako například litina.

2.2.1.2 Zkouška ohybem

Tato zkouška bývá prováděna z pravidla u křehkých materiálů. Jsou to materiály, které mají odpor proti průhybu a jsou náchylné k lomu, kdežto materiály houževnaté se ohnou snadněji a nemusí přitom zlomit, což je potřeba. Zkušební vzorek je podepřen na obou koncích, v nichž působí síly R , které jsou reakcí na zatěžovací sílu F (obr. 2.4). Největší ohybový moment bude působit na nejdelším rameni, tedy uprostřed. [6]



Obr. 2.4 Měření modulu z průhybu tyče [1]

Průhybem zjišťujeme hodnoty jako pevnost v ohybu vyjádřenou vztahem:

$$R_{mo} = \frac{M_{o \max}}{W_o} \quad [\text{MPa}] \quad (2.8)$$

v němž $M_{o \max}$ vyjadřuje maximální ohybový moment, tedy moment při lomu, který je dán silou:

$$M_{o\max} = R \cdot \frac{l}{2} = \frac{F}{2} \cdot \frac{l}{2} \quad [\text{Nm}] \quad (2.9)$$

dále W_o je modul průřezu v ohybu vyjádřen vztahem:

$$W_o = \frac{J}{z_{\max}} \quad [\text{m}^3] \quad (2.10)$$

kde J jest moment setrvačnosti průřezu k neutrální ose, dán jednotkami $[\text{m}^4]$

a z_{\max} je vzdálenost okrajového vlákna od neutrální osy $[\text{m}]$.

Modul kruhového průřezu je:

$$W_o = \frac{\pi \cdot d^3}{32} \quad [\text{m}^3] \quad (2.11)$$

Modul obdélníkového průřezu je:

$$W_o = \frac{b \cdot h^3}{6} \quad [\text{m}^3] \quad (2.12)$$

Zkoušený vzorek metodou ohybu je namáhán tahem i tlakem, při ohybu jsou spodní vlákna materiálu namáhána tahově, kdežto horní jsou namáhána tlakem.

Při konstantně zvětšující se síle je průběžně měřen průhyb y (3.10) do chvíle, kdy se zkušební vzorek přelomí.

$$y = \frac{F \cdot J_p^3}{48 \cdot E \cdot J} \quad [\text{mm}] \quad (2.13)$$

Stanovení modulu pružnosti pomocí tohoto vzorce bude popsán v další kapitole.

2.3 Modul pružnosti

Definice: Míra odporu materiálu vůči deformaci, tj. míra tuhosti materiálu, je definován poměrem síly působící kolmo na jednotku plochy k deformaci, kterou tato síla působí v oblasti pružných deformací. Jednotka modulu pružnosti je z pravidla $[\text{MPa}]$. Podle způsobu zkoušení rozeznáváme modul pružnosti v tahu značený E a modul pružnosti ve smyku značený písmenem G . Dále podle způsobu určování rozlišujeme statický a dynamický modul pružnosti. [6]

2.3.1 Staticky určený modul pružnosti

Zkouška je založena na postupném zvyšování zatížení, naměřené výsledky vzniklých deformací tj. prodloužení, jsou nižší v porovnání s metodou dynamickou. Tento rozdíl bude způsoben nejspíše tím, že při statické zkoušce bude napětí ve zkušebním vzorku nabývat větších hodnot než ve vzorku dynamické metody. Konkrétněji bude výše nežli fyzikální mez pružnosti, kdežto u dynamických metod bude právě pod touto hodnotou.

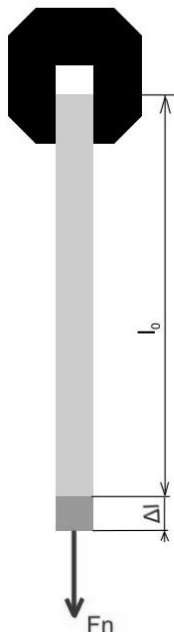
2.3.1.1 Stanovení modulu pružnosti v tahu přímou metodou

Youngův modul E je modul pružnosti v tahu s jednotkami [MPa], spočte se ze vztahu (3.11), který je dán normálovým napětím σ , ať je tlakové nebo tahové, ku poměrnému prodloužení ε v oblasti pružných deformací. Toto vyjádření je transformací Hookova zákona, který říká, že napětí v materiálu je přímo úměrné jeho deformaci. [6]

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad [\text{MPa}] \quad (2.14)$$

Napětí σ z předchozího vztahu je dáno poměrem síly F_n , tvořenou trhacím strojem v ose zkoušeného vzorku a jeho průřezovou plochou S .

$$\sigma = \frac{F_n}{S} \quad [\text{N/m}^2] \quad (2.15)$$



Poměrné prodloužení ve směru působení síly je definováno změnou délky zkoušeného vzorku, v našem případě pro malé deformace vztahem:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad [-] \quad (2.16)$$

Kde L_0 je původní délka zkoušeného vzorku a ΔL je samotné prodloužení po vyvození síly F_n ve směru osy vzorku, pro lepší představu zakresleno v obrázku 2.5. [6]

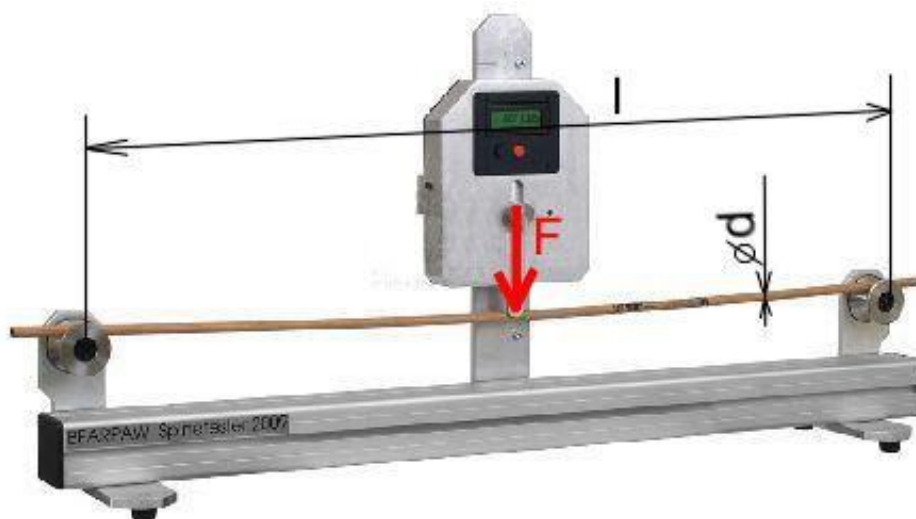
Obr. 2.5 Zatížený vzorek při zkoušce tahem [1]

Nyní po dosazení vztahu 2.15 a 2.16 do počátečního vzorce 2.14 odvozeného z Hookova zákona dostaneme výsledný tvar hledaného modulu pružnosti:

$$E = \frac{F_n}{S} \cdot \frac{L_0}{\Delta L} \quad [\text{MPa}] \quad (2.17)$$

2.3.1.2 Stanovení modulu pružnosti z průhybu tyče

Měřený vzorek tvaru hranolu nebo kulatiny, rovnoběžně podepřený podpěrami vzdálenými od sebe rozměrem l , je uprostřed zatěžován silou F vyvozenou závažím, která je kolmá k ose hranolu. Výsledkem silového zatížení je průhyb zkoušeného hranolu y , pro který platí výše uvedený vztah (2.13) z teorie pružnosti. Pro názornost je uvedena fotografie měřícího přístroje na obr. 2.6. [6]



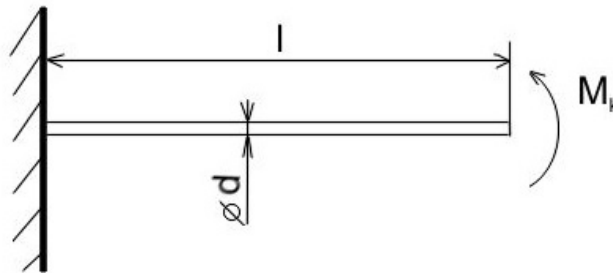
Obr. 2.6 digitální přístroj pro měření průhybu tyče [9]

2.3.1.3 Stanovení modulu pružnosti ve smyku

Zkušební vzorek, z pravidla hranol nebo tyč, o průměru d a délce l vetknutý na jednom konci a na druhém zatížen silovým momentem neboli silovou dvojicí, se prohne konvexně o úhel φ s jednotkami v radiánech, který lze vyjádřit ze vztahu:

$$\varphi = \frac{4 \cdot l \cdot M_k}{\pi \cdot G \cdot d} \quad [\text{rad}] \quad (2.18)$$

Moment M_k je vždy kladný, tak aby ohýbal tyč konvexně tj. do úsměvu, zřetelné na obrázku (Obr 2.7).



Obr. 2.7 schéma metody [1]

2.3.2 Dynamicky určený modul pružnosti

Jak již bylo v předchozím členění zmiňováno, u dynamické metody dosahuje napětí menších hodnot nežli u metody statické. Napětí ve vzorku se vždy pohybují pod fyzikální mezí pružnosti, proto zde nemusíme počítat s žádným odpružením, které by mohlo zkoušku jakkoli komplikovat. [1]

2.3.2.1 Určování modulu pružnosti ve smyku, metoda torzních kmitů

Metoda torzních kmitů využívá fyzikálního kyvadla pro měření výchylky kmitu, ze kterého se dále určuje modul pružnosti ve smyku, neboli modul torze. Pro těleso se setrvačností J , zavěšené na drátě o délce l s průměrem d , platí rovnice torzního kmitu:

$$J \cdot \varepsilon = \frac{G}{2\pi} \cdot \frac{\left[\pi \cdot \left(\frac{d}{2} \right)^2 \right]^2}{l} \cdot \varphi, \quad (2.19)$$

Přičemž G značí modul torze, φ výchylku od svislé rovnovážné polohy a ε úhlové zrychlení. Jelikož jsou kmity harmonické při libovolném rozkmitu, může výchylka od rovnovážné polohy nabývat větších rozměrů. Kruhovou frekvenci kmitajícího tělesa zavěšeného na drátě spočteme ze vztahu [1]:

$$\omega = \frac{4\pi^2}{T^2} = \frac{G}{\pi} \cdot \frac{\left[\pi \cdot \left(\frac{d}{2} \right)^2 \right]^2}{l \cdot J} \quad (2.20)$$

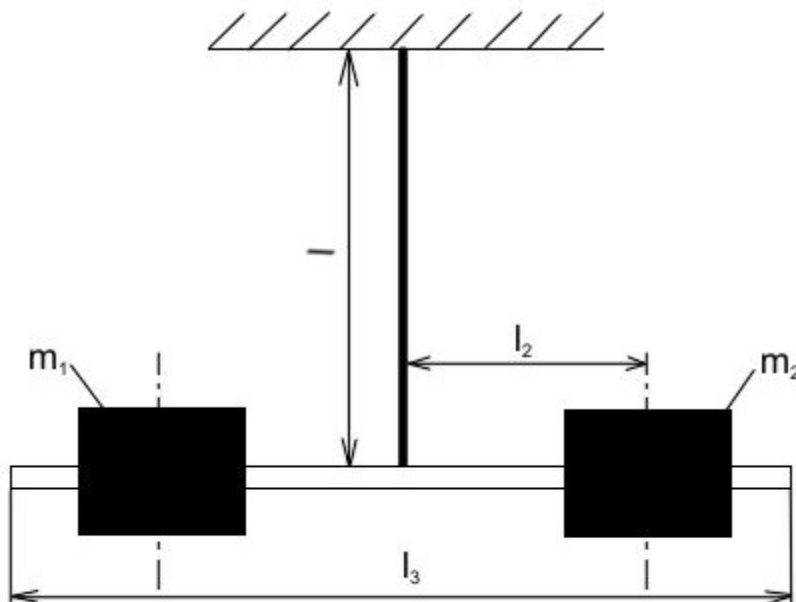
Odtud lze vyjádřit dobu kmitu:

$$T = \frac{2}{\left(\frac{d}{2} \right)^2} \sqrt{\frac{2\pi \cdot l \cdot J}{G}} \quad (2.21)$$

Zjistím-li hodnoty délku, průměr drátu, moment setrvačnosti a dobu kmitu, pak můžu určit samotný modul pružnosti ve smyku G vztahem:

$$G = \frac{8\pi \cdot l \cdot J}{\left(\frac{d}{2} \right)^4 \cdot T^2} \quad (2.22)$$

Schéma měřicí metody pro vyhodnocení modulu torze je vyobrazeno na obrázku (2.8).



Obr. 2.8 Schéma měření modulu pružnosti metodou torzních kmitů [1]

3. Experimentální část

Experimentální část bakalářské práce se zabývá měřením modulu pružnosti statickou metodou, tahovou zkouškou. Zjišťuji vliv použitých komponentů na výslednou hodnotu naměřeného modulu pružnosti. Měření jsem provedl pomocí laboratorního, počítačem řízeného, trhačního stroje za použití průtahoměru Epsilon Tech 3542, průtahoměru MFN A Standart 300 a dvou tenzometrických hlav, Kraftaufnehmer KAF s maximálním rozsahem 10kN a Kraftaufnehmer U2 s rozsahem 20kN. Měření bylo provedeno ve dvanácti sériích po desíti, kombinace všech komponentů a počátečních rozměrů použitých při tažení popisují v tomto pořadí (typ průtahoměru, počáteční délka a rozsah tenzometrické hlavy):

- Epsilon Tech 3542, 10mm, 10kN
- Epsilon Tech 3542, 10mm, 20kN
- Epsilon Tech 3542, 25mm, 10kN
- Epsilon Tech 3542, 25mm, 20kN
- Epsilon Tech 3542, 50mm, 10kN
- Epsilon Tech 3542, 50mm, 20kN
- MFN 400, 30mm, 10kN
- MFN 400, 30mm, 20kN
- MFN 400, 50mm, 10kN
- MFN 400, 50mm, 20kN
- MFN 400, 80mm, 10kN
- MFN 400, 80mm, 20kN

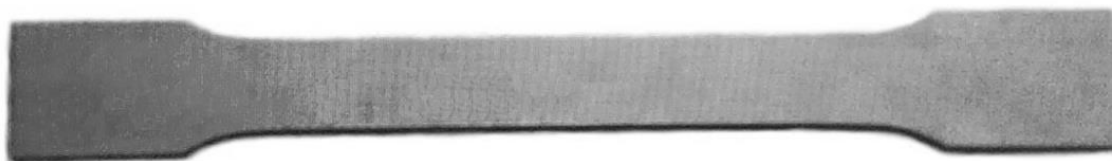
Měření bylo kompletně provedeno v laboratořích katedry strojírenské technologie. Naměřené výsledky byly získány přímou metodou softwarem přístroje, který vyhodnotil modul pružnosti hned při natahování vzorku. Výsledky dále byly zjišťovány dvěma způsoby, metodou směrnice přímky a derivováním přímkové části grafu, tyto dvě metody byly zpracovány pomocí programu Origin Pro 8.

3.1 Zkoušený materiál

Podle normy EN 10152 je tento materiál značen DC 05 ZE 50/50 BPO. Jedná se o ocelový plech válcovaný za studena s elektrolytickým pozinkováním povrchu, dále je fosfátován a olejován. Elektrolytické zinkování garantuje vysokou chemickou čistotu a rovnoměrnost tloušťky antikoroziční vrstvy s odchylkou $\pm 0,1 \mu\text{m}$. Díky jeho dobré tvářitelnosti a korozní odolnosti má velmi široké uplatnění, používá se pro výrobu strojních součástí, průmyslových zařízení, krytin střech a karosérií. [10]

3.2 Zkušební vzorek

Zkušební vzorek, vystřižený z tabule plechu, odpovídající normovaným rozměrům obdélníkového průřezu tahové zkoušky dle ČSN EN ISO 6892-1 (Obr. 3.1).



Obr. 3.1 Zkušební vzorek

3.3 Průběh zkoušky

Pro experiment bylo třeba připravit vzorky pro měření modulu pružnosti, které jsem vystříhal pomocí excentrického lisu LENP 40 (obr. 3.2) z tabule plechu výše zmíněného materiálu. Tento lis už měl upevněn střížník a střížnici pro stříhání normalizovaného tvaru vzorku tahové zkoušky. Pro všechny série měření bylo třeba deset výstřížků, tedy pro dvanáct kombinací měřidel po desíti byla potřeba 120 kusů.



Obr. 3.2 Střížný stroj (excentrický lis LENP 40)

Dále jsem zjišťoval rozměry vystřížených vzorků, které se museli zadat do softwaru vyhodnocujícího průběh tahové zkoušky v reálném čase. Vybral jsem si náhodně 20 vzorků, u kterých jsem naměřil tloušťku h a 20 vzorků pro měření šířky b (Tab. 3.1). Nakonec jsem toto měření zakončil spočtením střední hodnoty obou rozměrů.

Tab. 3.1 Rozměry zkoušených vzorků [mm]

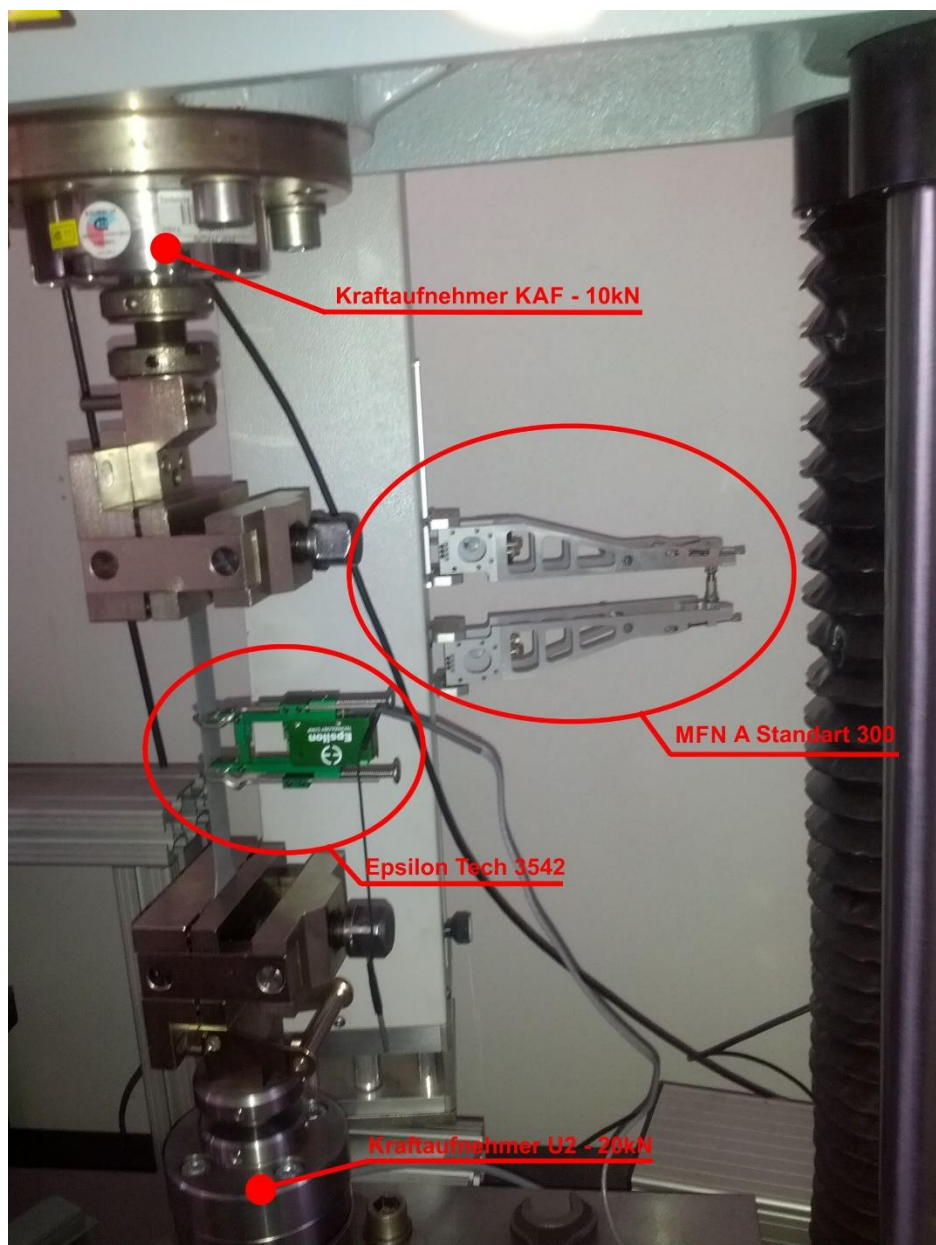
	Šířka b :	Tloušťka h :
Průměrná hodnota:	20,162	0,8102
Směrodatná odchylka:	0,011	0,0022

Po té jsem zahájil měření na trhacím stroji TIRAtest 2300 (Obr. 3.3). Nejprve ale bylo potřeba zjistit, jak bude vypadat kompletní tahová křivka tohoto materiálu. Na začátku procesu bylo třeba v řídícím softwaru Labtest, nastavit rozměry plus další hodnoty, jako rychlost namáhání atd. Po té jsem upnul vzorek do trhacího stroje, připevnil průtahoměr a spustil proces. Program hned vyhodnocoval napětí a průtah grafem v reálném čase až do přetržení. Po přetržení jsem vzorek vyndal z čelistí trhacího stroje a potvrdil příkaz pro vrácení čelistí do původní polohy. Tímto prvním měřením jsem zjistil důležité hodnoty materiálu jakožto mez kluzu, kterou jsem dále potřeboval k nastavení trhačky. Pro měření modulu pružnosti jsem nepotřeboval trhat všech 120 vzorků, bylo potřeba přesáhnout jen mez kluzu a vyvolat v materiálu počáteční plastickou operaci. Hodnotu napětí pro přesažení meze kluzu jsem vyhodnotil na 3000 N a dále ji nastavil jako mezní kritérium pro ukončení testu.



Obr. 3.3 Trhací stroj TIRAtest 2300

Dále už jsem jen namáhal vzorky do maximální síly 3000 N. Průtahoměr MFN A Standart 300 (obr. 3.4) byl připevněný k rámu přístroje, zatímco průtahoměr Epsilon Tech 3542 (obr. 3.4) byl jako samostatný přenosný komponent. Jejich výměna a připojení nebyla nijak složitá, spočívala ve vypnutí stroje, přepojení příslušných kabelů do správné patice a nastartování stroje a softwaru. Tenzometrická hlava KAF s rozsahem 10kN byla připevněna v horní části stroje nad upínacími čelistmi (obr. 3.4), druhá U2 s rozsahem 20kN pod upínacími čelistmi dole (obr. 3.4). Jejich přepojení na vstupy stroje se praktikovalo úplně stejně jako výměna extenzometrů.



Obr. 3.4 Foto použitých komponentů: průtahoměry Epsilon Tech 3542, MFN A Standart 300 a tenzometrické hlavy KAF 10kN a U2 20kN

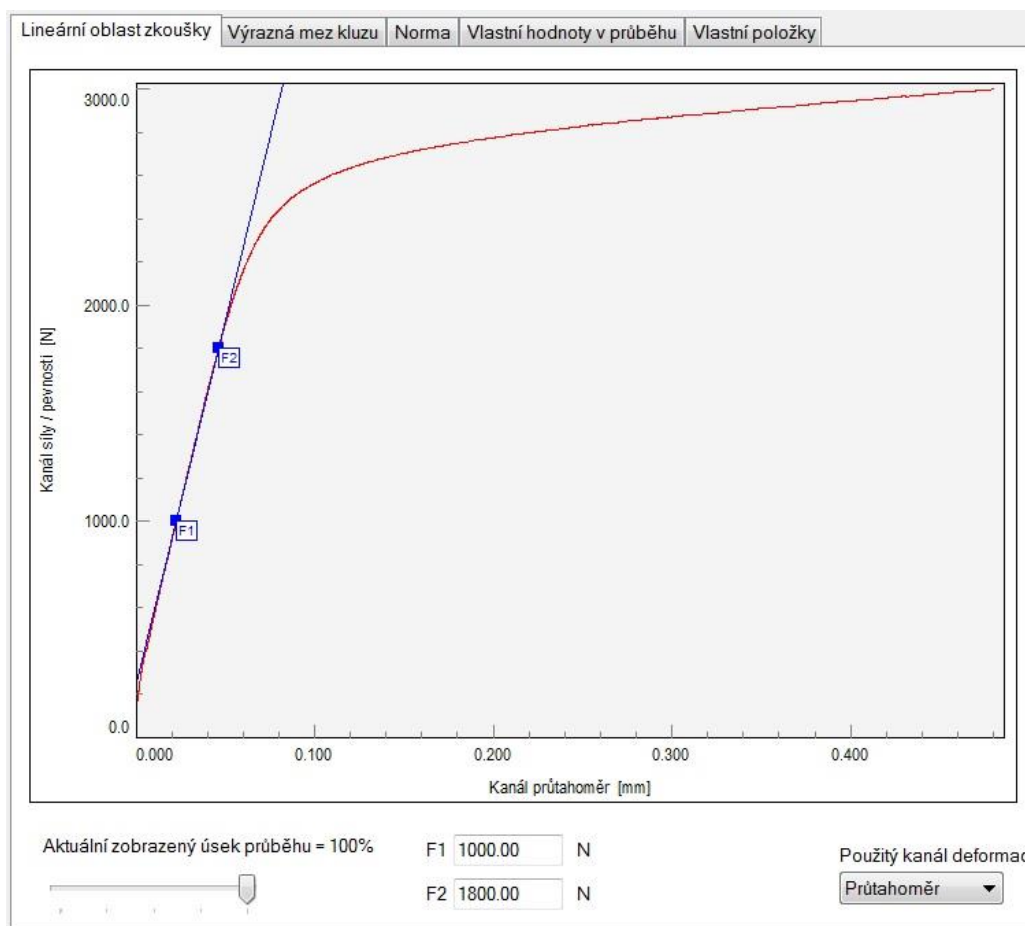
Po provedení měření všech dvanácti sérií po desíti vzorcích a získání výsledků modulu pružnosti přímou metodou bylo potřeba připravit si data, zaznamenaná softwarem Labtest, k další metodě zpracování a následnému hodnocení. Data jsem si pomocí softwaru vyexportoval do formátu MS Excel a tím je připravil pro další zpracování.

3.4 Zpracování naměřených hodnot

Naměřené hodnoty byly zpracovány třemi různými způsoby a to z toho důvodu, aby bylo možno zjistit, jestli odlišné metody zpracování mají vliv na zjišťovaný modul pružnosti. První metodou je získání výsledků přímo řídicím programem Labtest, tedy metoda přímá, druhá metoda určuje modul pružnosti pomocí směrnice přímky a třetí metoda určí výslednou hodnotu derivací přímkové části grafu.

3.4.1 Stanovení modulu pružnosti přímou metodou z Labtestu

Provedenou zkouškou byly získány výsledky modulu pružnosti přímou metodou z Labtestu a to tak, že software vyhodnocoval výsledky okamžitě při průběhu zkoušky z aktuálního průtahu a vyvozené síly. Výsledný graf po měření bylo potřeba omezit pouze na lineární část, tedy bylo nutné definovat oblast, ve které software počítal modul pružnosti. Tento modul je určován jako směrnice přímky procházející mnou zvolenými body. Tyto body byly zvoleny, tak aby ohraničily pouze lineární část grafu, tedy část pružné deformace (Obr. 3.5). Interval přímkové části jsem si zvolil od hodnoty síly 1000N po hodnotu 1800N. Z mnou omezené části pak ovládací software Labtest spočítal modul pružnosti (Tab. 3.2).



Obr. 3.5 Omezení přímkové části grafu, zpracováno Labtestem

Tab. 3.2 Tabulka výsledných hodnot modulů pružnosti naměřených přímou metodou [MPa]

Typ:	Epsilon Tech 3542					
	10mm 10kN	10mm 20kN	25mm 10kN	25mm 20kN	50mm 10kN	50mm 20kN
Výsledný modul E měřené série:	173992,7	170550,9	176507,4	164497,9	164249,5	153566,9
Směrodatná odchylka:	69534,612	40955,867	11943,754	3241,294	6010,03	11419,636
Typ:	MFN A Standart 300					
	30mm 10kN	30mm 20kN	50mm 10kN	50mm 20kN	80mm 10kN	80mm 20kN
Výsledný modul E měřené série:	165472,3	156222,9	169964,6	154707,3	174970	160161,2
Směrodatná odchylka:	139960,694	18434,787	8555,465	7163,417	6116,763	5797,301

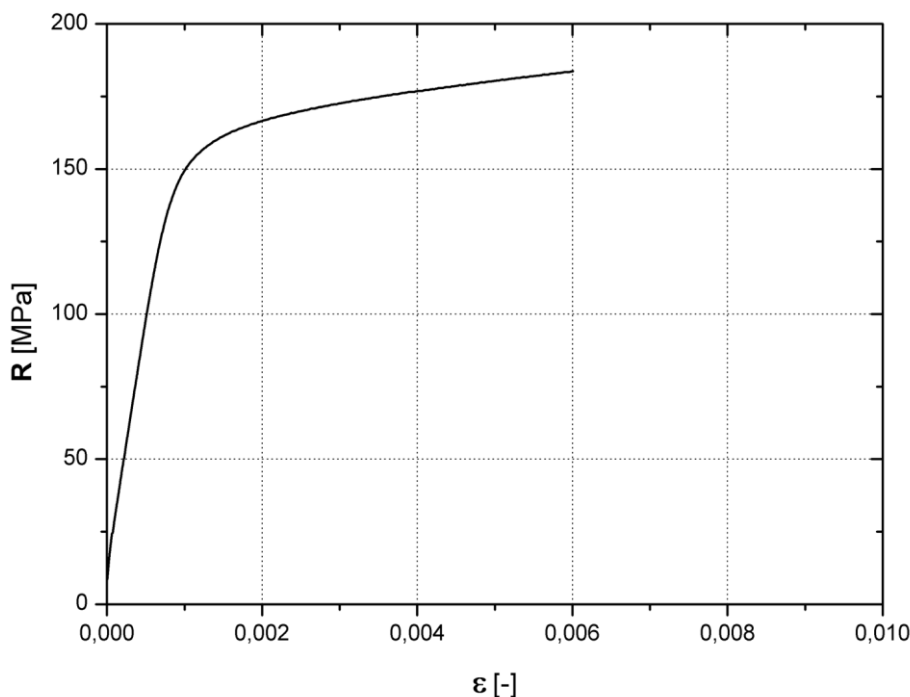
Dále bylo potřeba zpracovávat naměřená data pro další metodu, určení modulu pružnosti ze směrnice přímky. Pomocí šablony, vytvořené programem Origin Pro 8 pro každé L_0 samostatně, jsem z naměřených dat znázorněných v grafu jako průběh síly F v závislosti na absolutním prodloužení vzorku ΔL , vypočítal tímto programem napětí R podle vztahu:

$$R = \frac{F}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (3.1)$$

kde F je zatěžující síla a S_0 reprezentuje původní průřez spočtený vzorcem:

$$S_0 = b_0 \cdot h_0 \quad [\text{mm}^2] \quad (3.2)$$

kde a_0 , b_0 reprezentují počáteční šířku a tloušťku zkoušeného vzorku s rozměry udanými v tabulce 3.1 výše. Dále pomocí šablony vypočítám poměrné prodloužení ε podle rovnice 2.16 z kapitoly o tahové zkoušce. Po té jsem program Origin Pro 8 nechal z těchto dvou sérií hodnot vygenerovat příslušný graf zobrazený na obr. 3.6.



Obr. 3.6 Graf hodnot napětí závislých na poměrném prodloužení

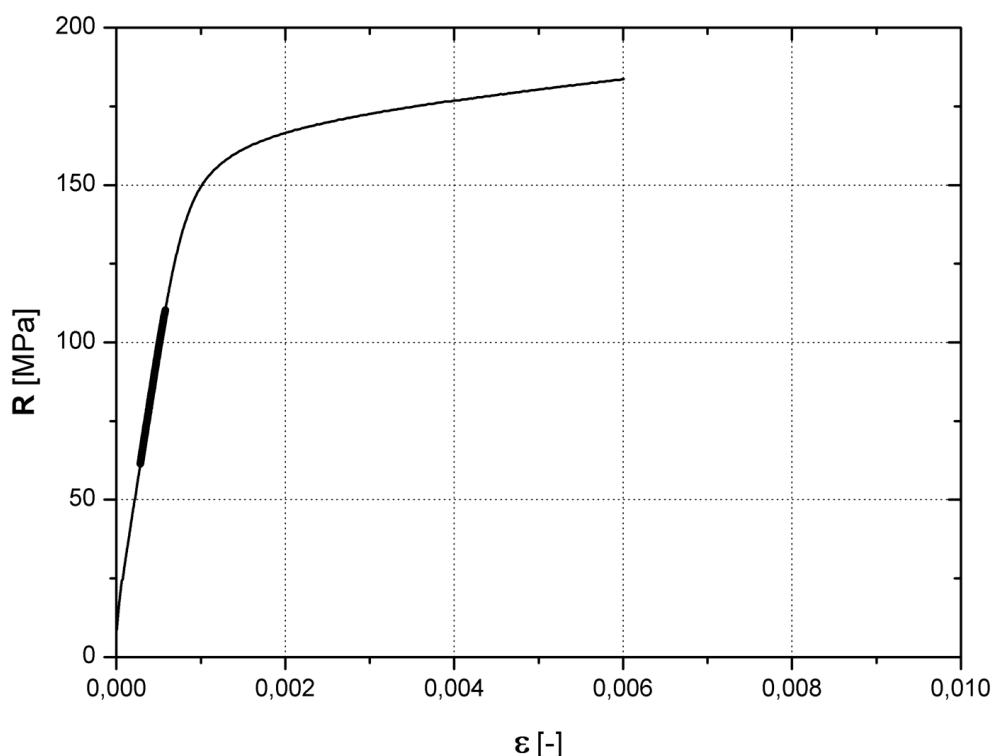
Z tohoto grafu bylo potřeba určitým způsobem dostat modul pružnosti. Jelikož Hookův zákon platí pro pružnou deformaci, kterou reprezentuje počáteční lineární část grafu, pak směrnice této lineární části musí být Youngův modul pružnosti E , protože pracujeme s grafem znázorňující závislost napětí R (σ) na poměrném

prodloužení ε . Záměna symbolů napětí σ a smluvního napětí R je možná jen v rozmezí pružné deformace.

Pro získání směrnice přímky je třeba tyto naměřené hodnoty, odpovídající pružné deformaci, proložit přímkou z toho důvodu, že tato část grafu není ve skutečnosti přímkou, nýbrž křivkou skládající se z mnoha přímek spojujících naměřené hodnoty pružné deformace. Z této už opravdové přímky mohu určit její směrnici, postup popisuji v dalším bodě.

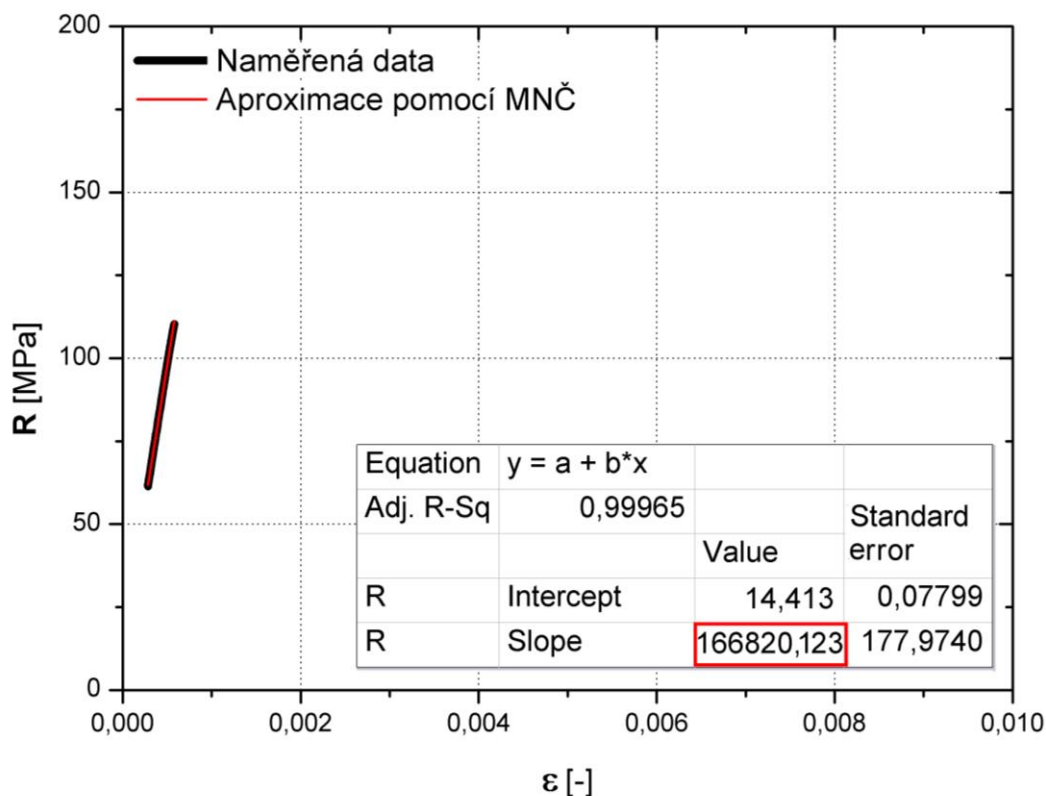
3.4.2 Stanovení modulu pružnosti směrnici přímky

Graf, který jsem v předchozím kroku vygeneroval, bylo dále potřeba omezit jen na část, která se zdála být přímkou. Omezil jsem tedy graf stejnými hodnotami jako u předchozí přímé metody. Intervaly síly byli opět od 1000 N do 1800 N (obr. 3.7).



Obr. 3.7 Graf reprezentující přímkový interval značený silnou čarou

Výsledek jsem získal příkazem pro zjištění směrnice přímky, kterou jsem již proložil hodnotami intervalu, které bylo potřeba zjistit z původního grafu tahové zkoušky, popisující závislost síly F na prodloužení ΔL . Výsledek byl zobrazen v této podobě (obr. 3.8).



Obr. 3.8 Graf výsledné hodnoty určené směrnici přímky

Vygenerované výsledky zobrazují v tabulce 3.3.

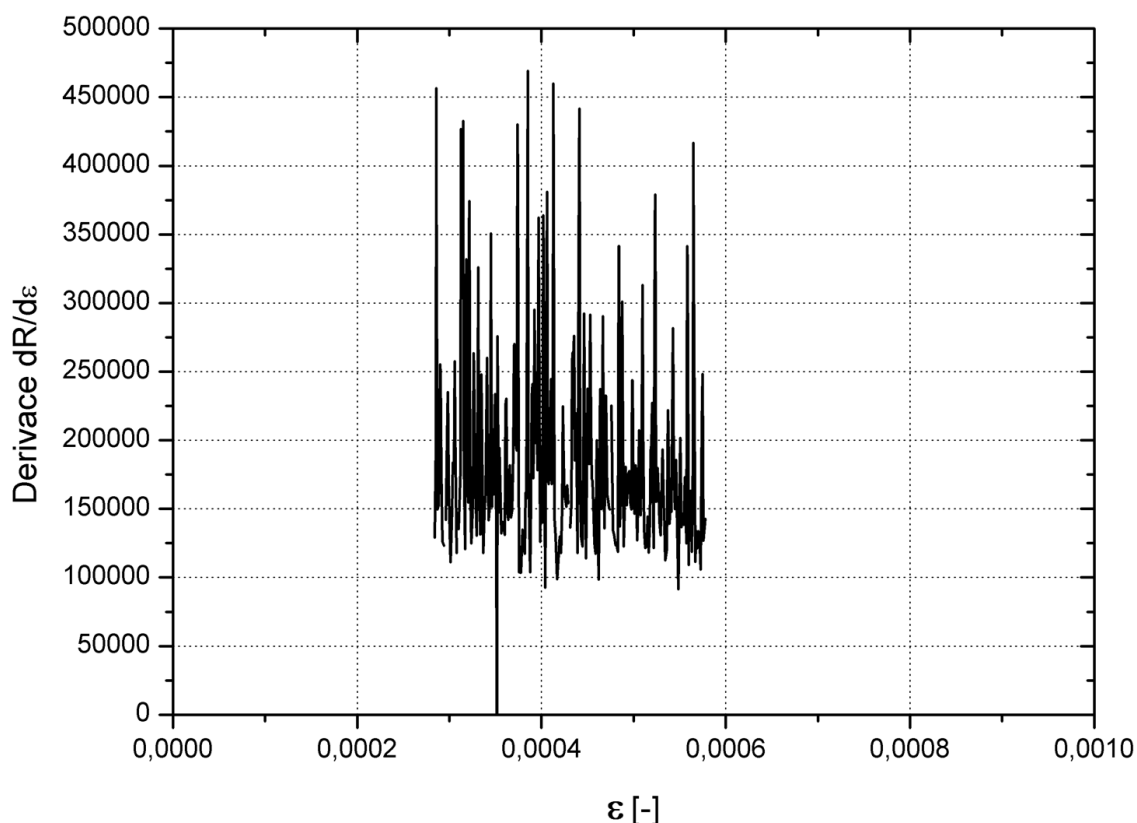
Tab. 3.3 Modul E jako směrnice přímky, zjištěné hodnoty mají jednotku [MPa]

Typ:	Epsilon Tech 3542					
	10mm 10kN	10mm 20kN	25mm 10kN	25mm 20kN	50mm 10kN	50mm 20kN
Výsledný modul E měřené série:	176877,379	169677,285	178129,193	165649,900	165069,278	154443,900
Směrodatná odchylka:	75201,486	40733,923	12602,322	3548,479	6083,464	11690,743
Typ:	MFN A Standart 300					
	30mm 10kN	30mm 20kN	50mm 10kN	50mm 20kN	80mm 10kN	80mm 20kN
První výsl. v sérii:	169851,830	187036,261	170620,490	155096,460	166820,123	166803,794
Výsledný modul E měřené série:	166517,517	157387,498	171097,659	155694,447	174548,956	161346,760
Směrodatná odchylka:	14851,796	19256,627	8361,359	7329,661	5782,265	5970,84

3.4.3 Stanovení modulu pružnosti derivací přímky

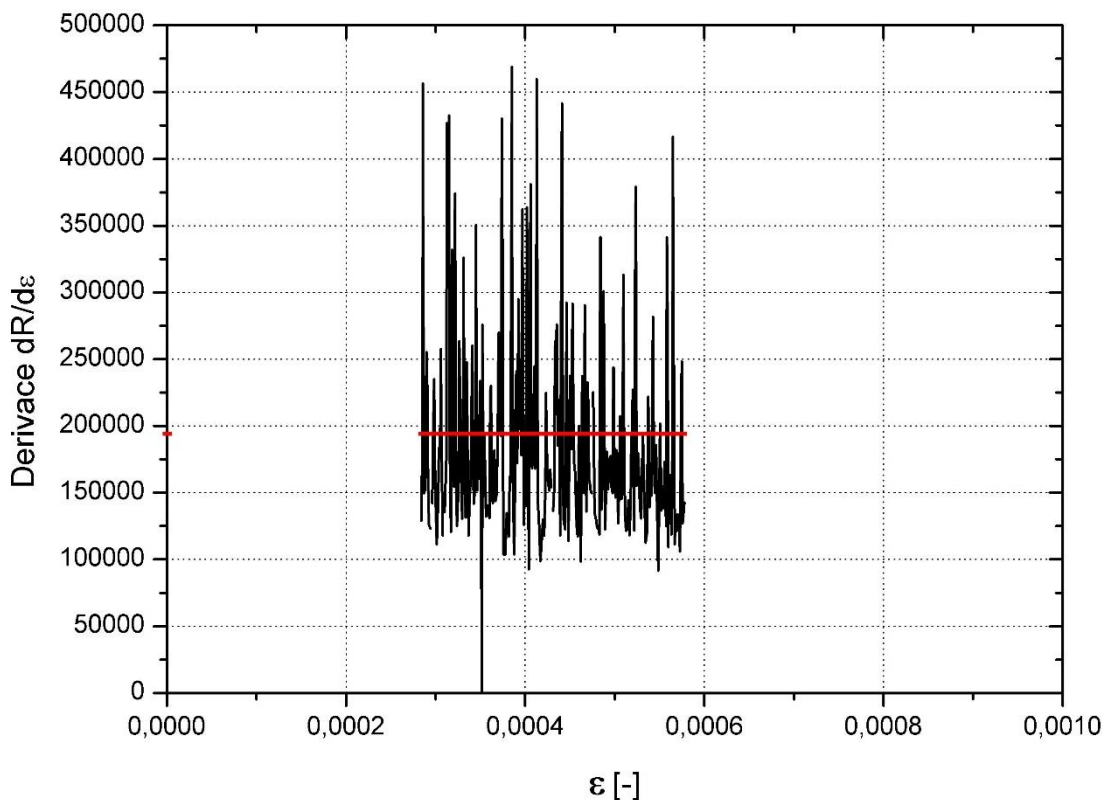
Při praktikování tohoto určení modulu pružnosti jsem vycházel z úvahy, že když vezmu funkci tvaru obecného vyjádření přímky a zderivuji ji podle x , po derivaci zbyde pouze směrnice přímky, která je sama o sobě i modul pružnosti.

Prakticky musím toto vyhodnocení udělat o něco složitěji, protože po derivaci získám graf v podobě soustavy přímek (obr. 3.9).



Obr. 3.9 Graf derivace předchozí přímky

Je tedy potřeba z těchto hodnot, které jsou výsledkem derivace, určit jejich střední hodnotu (obr 3.10). Výsledné hodnoty zobrazuji v tabulce 3.4.



Obr. 3.10 Graf derivace předchozí přímky se střední hodnotou

Tab. 3.4 Výsledné hodnoty, přímky po derivaci [MPa]

Typ:	Epsilon Tech 3542					
	10mm 10kN	10mm 20kN	25mm 10kN	25mm 20kN	50mm 10kN	50mm 20kN
Výsledný modul E měřené série:	31272,211	11653,367	114873,204	120319,505	194520,185	180056,784
Směrodatná odchylka:	8509,59	7772,517	11927,21	7591,375	8233,919	5970,84
Typ:	MFN A Standart 300					
	30mm 10kN	30mm 20kN	50mm 10kN	50mm 20kN	80mm 10kN	80mm 20kN
První výsl. v sérii:	117895,041	101855,308	179857,275	174389,854	196167,016	190485,878
Výsledný modul E měřené série:	114923,550	111431,348	184956,566	173897,353	213488,580	187490,042
Směrodatná odchylka:	8509,59	7772,517	11927,21	7591,375	8233,919	5970,84

Veškeré hodnoty a křivky v grafech reprezentují první měření s průtahoměrem MFN A Standart 300 s počáteční délkou L_0 80mm a maximální hodnotou siloměrné hlavy 10kN. V tabulkách výsledků byla tato hodnota označena růžovým políčkem. Celý postup hodnocení výsledků patří právě těmto dvěma hodnotám, přímkové a derivované.

3.4.4 Statistické zpracování hodnot

Statistická metoda byla do zpracování výsledků začleněna pro zjištění vlivů všech použitých snímačů při měření na výsledný modul pružnosti. Zde za pomoci výpočtů byl zjištěn vliv samotného typu průtahoměru na měřené hodnoty modulu E . Dále se v této kapitole zjišťovalo, zda mají na výsledné hodnoty vliv rozdílné počáteční délky u jednotlivých typů průtahoměrů a vliv změny tenzometrické hlavy. Naposledy bylo zjištěno, zdali mají vliv na výsledek rozdílné metody určení modulu pružnosti, byla tedy porovnána metoda určení směrnicí s přímou metodou a metoda derivací také přímou metodou.

K tomuto zhodnocení byla použita statistická metoda popisující testování rozdílu mezi průměrnými hodnotami dvou skupin měření pro případ různých rozptylů základních souborů. Testovaná hladina významnosti byla 95%, potom tedy nabývá hodnoty $\alpha = 5\%$. [11]

Metoda vycházela z předpokladu, platil-li vzorec:

$$\frac{\bar{x} - \bar{y}}{s_0} > \frac{v_1 \cdot t_{(1-\frac{\alpha}{2}; k_1)} + v_2 \cdot t_{(1-\frac{\alpha}{2}; k_2)}}{v_1 + v_2} \quad (3.3)$$

pak měl vliv testovaný element na výslednou hodnotu modulu pružnosti. Ve vzorci x a y s pruhem reprezentovali střední hodnoty testovaných skupin, které už byly spočteny v tabulkách 3.2, 3.3 a 3.4. Dále hodnota s_0 na levé straně vzorce se spočetla vztahem:

$$s_0 = (v_1 + v_2)^{\frac{1}{2}} \quad (3.4)$$

přičemž v_1, v_2 se vypočtou vzorcem:

$$v_{1,2} = \frac{s_{1,2}^2}{n_{1,2}} \quad (3.5)$$

kde n_1 značí počet prvků jedné porovnávané skupiny a n_2 druhé. Hodnoty s_1 a s_2 se dále vypočetli ze vztahů [11]:

$$s^2_1 = \frac{1}{n_1 - 1} \cdot \sum_{i=1}^{n_1} (x_i - \bar{x})^2 \quad (3.6)$$

$$s^2_2 = \frac{1}{n_2 - 1} \cdot \sum_{i=1}^{n_2} (y_i - \bar{y})^2 \quad (3.7)$$

Poslední chybějící hodnota z prvního vzorce, popisující nerovnost, byla $t_{(1-\alpha/2;k)}$, která se zjišťuje z tabulky (Příloha 4) v příloze. [11]

Statistický test byl proveden pro všechny výše vyjmenované elementy měření. Zjištěné hodnoty jsem zpracoval v tabulce 3.5.

Tab. 3.5 Vliv jednotlivých komponentů a zpracování výsledků

Vliv tenzometrické hlavy na výsledné hodnoty měření:		
Epsilon Tech 3542:	při 10mm	NE
	při 25mm	ANO
	při 50mm	ANO
MFN A Standart 300:	při 30mm	NE
	při 50mm	ANO
	při 80mm	ANO
Vliv typu průtahoměru na výsledné hodnoty měření:		
při 10kN		NE
při 20kN		NE
Vliv počátečních délek na výsledné hodnoty měření:		
Epsilon Tech 3542:	vliv mezi 10mm a 25mm	NE
	vliv mezi 25mm a 50mm	ANO
	vliv mezi 10mm a 50mm	NE
MFN A Standart 300:	vliv mezi 30mm a 50mm	NE
	vliv mezi 50mm a 80mm	NE
	vliv mezi 30mm a 80mm	NE

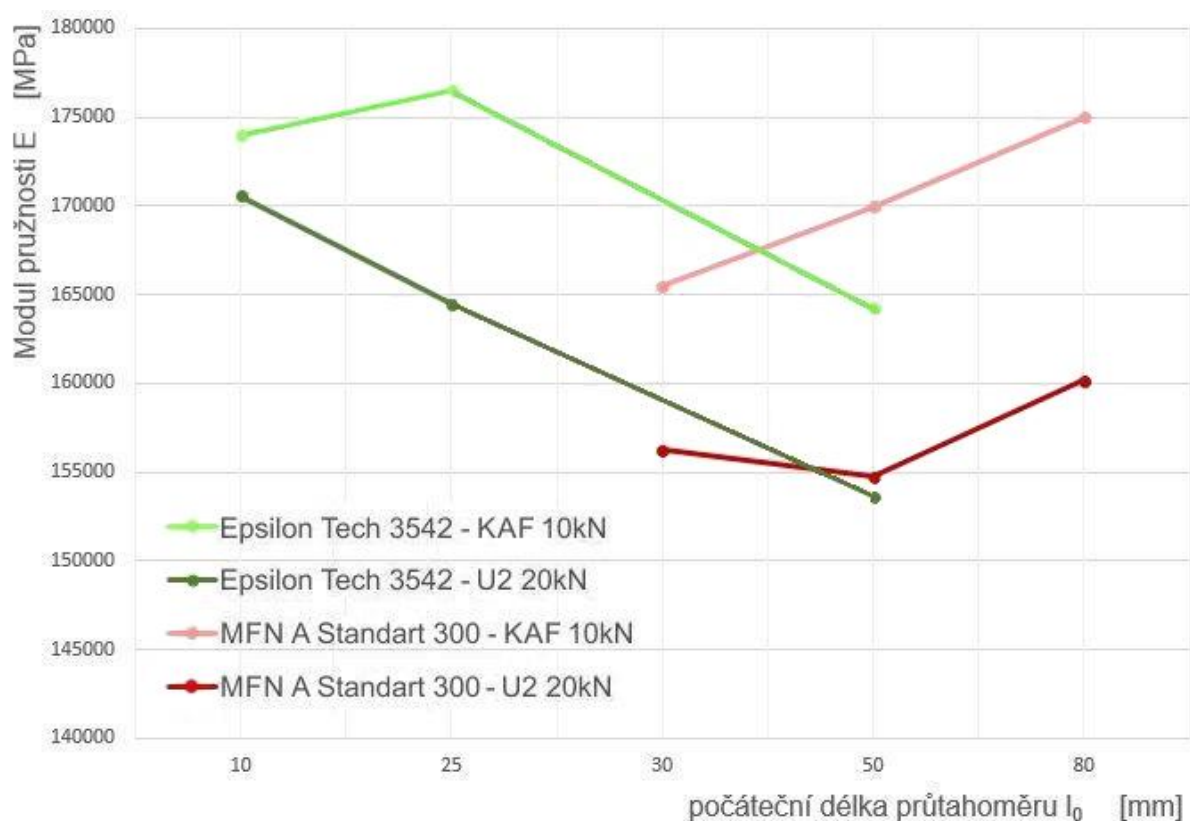


Vliv způsobu určení výsledků na výsledné hodnoty měření:		
Porovnání:	přímé a směrníkové	přímé a derivací
EPS_10mm_10kN	NE	ANO
EPS_10mm_20kN	NE	ANO
EPS_25mm_10kN	NE	ANO
EPS_25mm_20kN	NE	ANO
EPS_50mm_10kN	NE	ANO
EPS_50mm_20kN	NE	ANO
MFN_30mm_10kN	NE	ANO
MFN_30mm_20kN	NE	ANO
MFN_50mm_10kN	NE	ANO
MFN_50mm_20kN	NE	ANO
MFN_80mm_10kN	NE	ANO
MFN_80mm_20kN	NE	ANO

4. Vyhodnocení výsledků zkoušky

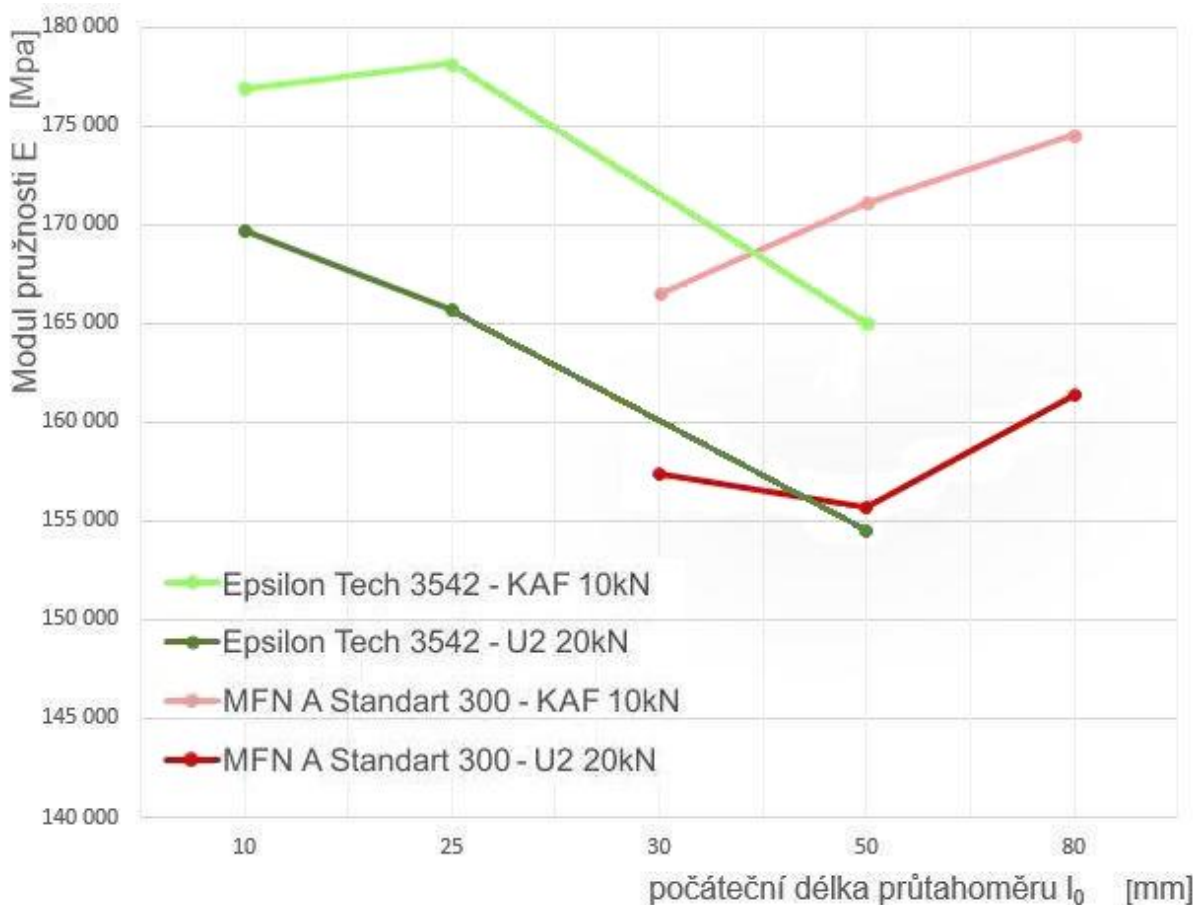
Pro hodnocení výsledků bylo potřeba vymyslet co nejprehlednější graf, aby z něho byly patrné a dobře porovnatelné rozdíly mezi jednotlivými kombinacemi měřících komponentů a vzájemné porovnání vlivu jednotlivých počátečních rozměrů.

Nejvhodnější volba se zdála jako spojnicový graf modulu pružnosti v závislosti na počáteční délce průtahoměru, kde by křivky měli reprezentovat jednotlivé typy průtahoměrů v kombinaci s tenzometrickými hlavami. Takto zpracovaný graf výsledků modulu pružnosti zjištěných přímou metodou je vidět na obrázku 4.1.



Obr. 4.1 Graf zjištěných hodnot přímou metodou

4.1 Vyhodnocení výsledků získaných směrnici přímky



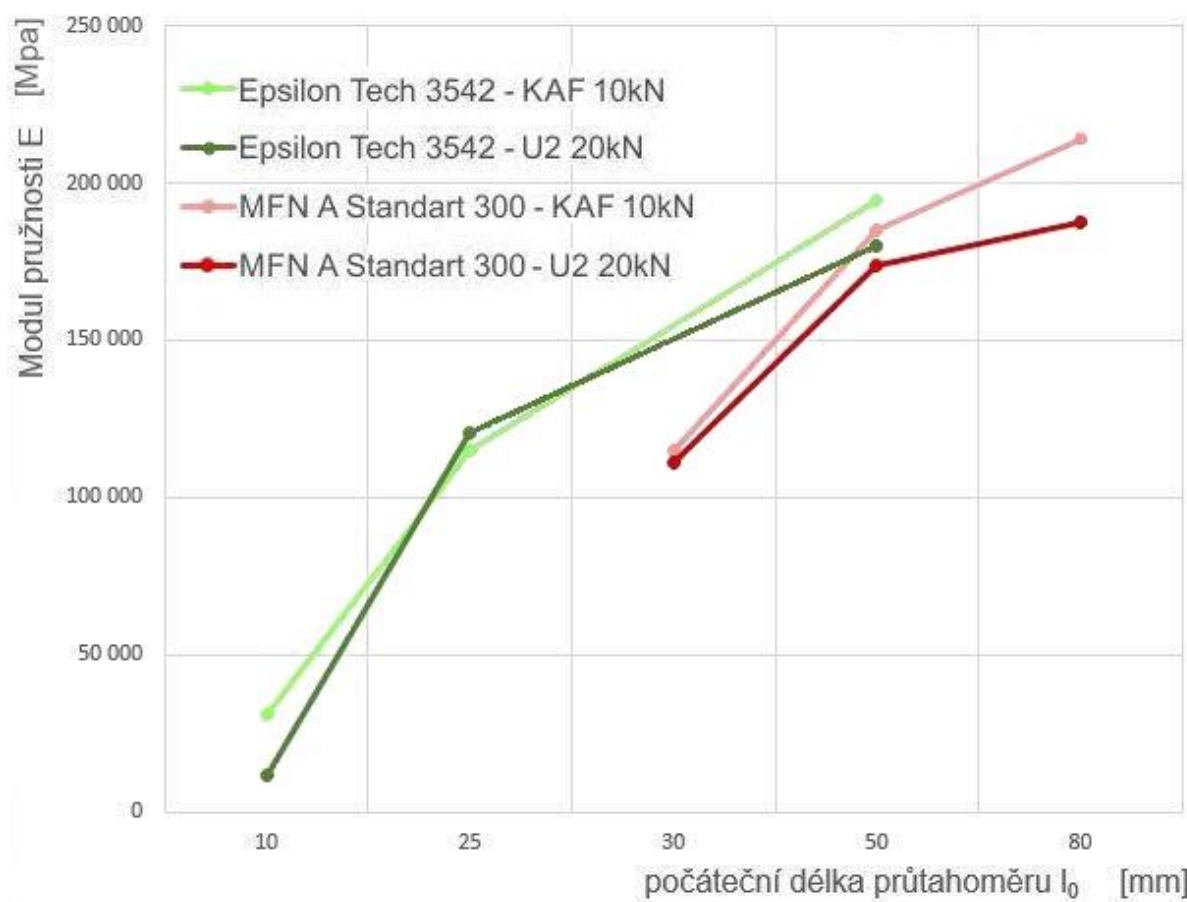
Obr. 4.2 Graf změny modulu pružnosti závislé na počáteční délce průtahoměru

Graf výsledků přímé metody (obr. 4.1) je téměř stejný jako graf směrnice metody (obr. 4.2), z čehož vyplývá, že metody určení modulu pružnosti vykazují téměř stejnou přesnost. Grafy znázorňují změnu modulu pružnosti E v závislosti na počáteční délce L_0 . Každá křivka znázorňuje jednotlivý typ průtahoměru v kombinaci s tenzometrickou hlavou. Křivka světle zelená znázorňuje průtahoměr Epsilon Tech 3542 zapojen v kombinaci s 10kN tenzometrickou hlavou a měřenými počátečními délkami 10, 25 a 50 mm, tmavě zelená průtahoměr Epsilon Tech 3542 s 20kN tenzometrickou hlavou se stejnými počátečními rozměry. Další série počátečních délek 30, 50 a 80mm, značená růžovou křivkou, byla měřena průtahoměrem MFN A Standart 300 zapojeným v kombinaci s 10kN tenzometrickou hlavou. Poslední tmavě červená křivka v grafu reprezentuje opět průtahoměr MFN A Standart 300 ale tentokrát s 20kN hlavou.

Z grafů obou metod je patrné, že měřené hodnoty modulu pružnosti, za pomoci průtahoměru Epsilon Tech 3542, se zmenšují v doprovodu se zvětšující se počáteční délkou L_0 . Hodnoty modulu E měřené za pomoci průtahoměru MFN A Standart 300 se naopak v doprovodu se zvětšující se počáteční délkou zvyšují. Z grafů lze dále vyčíst, že i změna siloměrné hlavy má vliv na naměřené hodnoty. Pomocí hlavy s rozsahem 20kN hodnoty modulu pružnosti dosahují nižších hodnot nežli hodnoty naměřené 10kN hlavou.

Při pohledu na graf je také vidět, že měřený modul pružnosti průtahoměrem Epsilon Tech 3542 se pohybuje ve větším rozmezí výsledných hodnot. Tento jev, vedoucí k větší chybovosti, nejspíše zapříčinila sada komponentů průtahoměru umožňující měření při menších počátečních délkách.

4.2 Vyhodnocení výsledků získaných derivováním přímky



Obr. 4.3 Graf hodnot modulu pružnosti získaných derivací přímek reprezentujících lineární část grafu tahové zkoušky

Barvy křivek v tomto grafu (obr 4.3) reprezentují stejné uspořádání typů průtahoměrů v kombinaci se siloměrnými hlavami a měřeními sériemi počátečních délek.

Záměna tenzometrických hlav se v tomto případě odráží daleko méně, není patrný tak velký vliv jako u modulu E určeným směrnici a přímou metodou. Z grafu dále vyčtu, že vliv zvyšující se počáteční délky obou průtahoměrů působí zvětšující tendencí na modul pružnosti.

Mezi hodnotami modulu pružnosti určenými derivací jsem zaznamenal daleko větší rozsah hodnot u průtahoměru Epsilon Tech 3542 než v předchozím určení pomocí směrnice přímky a přímé metody. Rozptyl je tak veliký, že tato metoda určování výsledné hodnoty modulu pro tento průtahoměr je nevhodná. Tento rozptyl je zapříčiněn opět sadou komponentů umožňujících měření při menších počátečních rozměrech L_0 .

4.3 Vyhodnocení výsledků statistické metody

Statistickým hodnocením bylo spočteno, jestli jednotlivé komponenty při měření mají vliv na výslednou hodnotu modulu pružnosti. Podle výsledků zpracovaných v tabulce 3.5 bylo zjištěno, že záměna tenzometrické hlavy, při rozměrech 25 a 50mm náležících průtahoměru Epsilon Tech 3542 dále při rozměrech 50 a 80mm náležících průtahoměru MFN A Standart 300, má vliv na výsledné hodnoty. Záměna typu průtahoměru, kterou lze určit pouze u stejných rozměrů, což je 50mm, nemá žádný vliv na výsledné hodnoty modulu pružnosti.

Dále byl zjištěn vliv záměny jednotlivých počátečních délek u každého průtahoměru zvlášť. Vliv se projevil pouze u průtahoměru Epsilon Tech 3542 a to konkrétně u porovnání délek 25 a 50mm.

Tyto vlivy vypočítané statistickou metodou byly stanoveny pro určování modulu pružnosti přímou metodou a metodou směrnice přímky. Na závěr tohoto hodnocení byly porovnány metody vyhodnocení pro všechna měření. Porovnávání bylo spočítáno mezi přímou metodou a metodou směrnice přímky, z čehož se neprokázal vliv u žádné série měření. Toto hodnocení potvrdilo stejnou přesnost obou metod, která je patrná při porovnání grafů na obrázcích 4.1 a 4.2 Při porovnání přímé metody a metody derivace vyšel vliv u každé série měření.

5. ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo zjišťování modulu pružnosti statickou metodou, reprezentovala ji tahová zkouška. Tato práce měla za úkol zjistit vliv použitých snímačů a dále vliv rozdílného způsobu vyhodnocení výsledků na výsledné hodnoty modulu pružnosti v tahu. Při měření byla použita tato měřidla, tenzometrická hlava KAF s maximálním rozsahem 10kN, tenzometrická hlava U2 s maximálním rozsahem 20kN, průtahoměr Epsilon Tech 3542 se sadou menších počátečních rozměrů 10, 25, 50mm a průtahoměr MFN A Standart 300 se sadou větších počátečních rozměrů 30, 50, 80mm.

V experimentální části byly naměřeny zkoušky pro různé kombinace počátečních délek a typů měřidel síly a délky. Naměřená data byla zpracována třemi různými metodami, přímou metodou z Labtestu, metodou směrnice přímky a derivací přímkové části grafu. Zpracované výsledky modulu pružnosti byly podrobeny statistickým testům shody střední hodnoty, z čehož byl zjištěn vliv měřidel na výsledné hodnoty.

Závěrem bylo zjištěno, že u průtahoměru Epsilon Tech 3542 se sérií menších počátečních rozměrů L_0 10, 25 a 50mm je větší rozptyl měřených hodnot modulu pružnosti než u průtahoměru MFN A Standart 300 se sérií větších počátečních rozměrů 30, 50 a 80mm. Tento poznatek vyplynul jak z metody první a druhé, tak i ze způsobu zpracování výsledků pomocí derivace. Zde byl rozptyl u průtahoměru Epsilon Tech 3542 tak veliký, že lze říci, že metoda derivace přímkové části grafu je pro určení modulu E nevhodná.

Dále bylo zjištěno z grafů na obr. 4.1 a 4.2 podle metody přímého určení modulu pružnosti a modulu pružnosti určeného směrnicí přímky, že tenzometrickou hlavou s maximálním rozsahem 10kN byly naměřeny vyšší výsledné hodnoty a to u všech sérií počátečních délek. U poslední metody, určení modulu pružnosti derivací, tento jev nebyl patrný, to ale bylo zapříčiněno velkým rozptylem výsledných hodnot.

Statistickým testem shody střední hodnoty byl zjištěn vliv použitých komponentů při měření. Byl prokázán vliv záměny tenzometrické hlavy s rozsahem 10 a 20kN při rozměrech 25 a 50mm průtahoměru Epsilon Tech 3542, dále vliv při rozměrech 50 a 80mm náležících průtahoměru MFN A Standart 300. Při porovnání počátečních rozměrů jednotlivých průtahoměrů byl prokázán vliv pouze u hodnot měřidla Epsilon Tech 3542, kde výsledný vliv vyšel pozitivně pouze při porovnání

sérií výsledků měření při rozměrech 25 a 50mm. Nakonec testem shody střední hodnoty byl prokázán vliv při rozdílném použití vyhodnocení výsledků. Pozitivně vyšel pouze vliv při určování výsledů derivací přímkové části grafu v porovnání s předchozími metodami. Tento výsledek byl patrný už při porovnání předchozích výsledných grafů a jen potvrzuje předchozí úvahu o nevhodnosti metody derivace pro vyhodnocení výsledků.

I přesto, že ve všech případech měření byly použity cejchované měřicí snímače, naměřené hodnoty se lišily. Pro určité kombinace zvolených měřících snímačů a počátečních délek L_0 byl v některých případech prokázán vliv způsobu měření na výsledek zkoušky. Větší rozptyl měření u průtahoměru Epsilon Tech 3542 byl dán pravděpodobně tím, že používá menší počáteční délky měřeného úseku při tahové zkoušce a tím zvyšujeme chybu měření.

Na základě výsledků provedených měření v této bakalářské práci doporučuji, pro přesná měření modulu pružnosti používat co největší počáteční délky měřeného úseku L_0 a snímač síly odpovídající předpokládané měřené hodnotě. Se zvětšujícím se rozsahem siloměrného snímače se opět zvyšuje chybovost měření.

6. Seznam použité literatury

- [1] ŠIMÁČEK, S.: Zjišťování modulu pružnosti pevnostních plechů, Liberec 2006
- [2] http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/mtk/MTK3.pdf , duben 2013
- [3] <http://referaty.aktuality.sk/hlbokotazne-occe/referat-3125#> , duben 2013
- [4] http://www.jfe-21st-cf.or.jp/chapter_1/1b_2.html , květen 2013
- [5] ALAXIN, J. a kol.: Nauka o materiálu, VŠST, Liberec 1989
- [6] JAREŠ, V.: Základní zkoušky kovů a jejich teorie, Academia, Praha 1966
- [7] http://www.strojirenstvi.wz.cz/stt/rocnik1/06a_pruznost_pevnost.php, duben 2013
- [8] <http://home.zcu.cz/~dyxon/DATA/Nauka%20o%20M/Zkouska.pdf> , květen 2013
- [9] <http://www.luky-sipy.cz/lukostrelecke-potreby/prislusenstvi-pomocne-naradi/bearpaw-digital-spinetester-eco> , květen 2013
- [10] <http://www.alfun.cz/sortiment/ocel/ocelove-plechy-a-pasy-valcovane-za-studena-elektro> , květen 2013
- [11] DRÁB, V.; MOC, L.: Teorie spolehlivosti a řízení jakosti, Liberec 1992

7. Seznam příloh

- Příloha 1: Výsledné zpracované hodnoty modulu pružnosti přímou metodou z Labtestu
- Příloha 2: Výsledné zpracované hodnoty modulu pružnosti metodou směrnice přímkové části grafu
- Příloha 3: Výsledné zpracované hodnoty modulu pružnosti metodou derivace přímkové části grafu
- Příloha 4: Tabulka kvantilů pro zjištění hodnoty t



Příloha 1: Výsledné zpracované hodnoty modulu pružnosti přímou metodou z Labtestu

Typ:	Epsilon Tech 3542					
	10mm 10kN	10mm 20kN	25mm 10kN	25mm 20kN	50mm 10kN	50mm 20kN
1.	164364	230768	168087	162672	157798	150570
2.	166459	189114	205369	160697	156487	153568
3.	169629	149445	168550	164309	169629	126630
4.	162187	111891	183036	161120	160724	159910
5.	171861	160329	182559	162295	166205	149376
6.	175400	126401	167226	167226	156113	164337
7.	361287	136246	171201	165979	167026	155939
8.	124632	175243	169015	171621	173198	150918
9.	110007	199310	169424	164309	168289	155026
10.	134101	226762	180607	164751	167026	169395
Průměr:	173992,7	170550,9	176507,4	164497,9	164249,5	153566,9
Směrodatná odchylka:	69534,612	40955,867	11943,754	3241,294	6010,03	11419,636
Typ:	MFN A Standart 300					
	30mm 10kN	30mm 20kN	50mm 10kN	50mm 20kN	80mm 10kN	80mm 20kN
1.	167359	185065	170308	154260	165615	164862
2.	177809	165326	166284	155790	165307	157951
3.	172466	134267	171837	157473	171741	164254
4.	138939	157663	167558	163181	181208	149994
5.	165699	145142	174233	164585	175400	161492
6.	173772	149635	158575	139976	179383	161625
7.	179284	170308	169788	148031	182831	164557
8.	162906	123563	180022	150988	177113	162187
9.	142717	160557	156627	157473	172406	149856
10.	173772	170703	184414	155316	178696	164834
Průměr:	165472,3	156222,9	169964,6	154707,3	174970	160161,2
Směrodatná odchylka:	139960,694	18434,787	8555,465	7163,417	6116,763	5797,301

Příloha 2: Výsledné zpracované hodnoty modulu pružnosti metodou směrnice přímkové části grafu

Typ:	Epsilon Tech 3542					
	10mm 10kN	10mm 20kN	25mm 10kN	25mm 20kN	50mm 10kN	50mm 20kN
1.	163864,786	232475,848	169036,838	163840,605	158042,820	150452,586
2.	167396,103	194023,075	208905,498	162019,615	157704,657	154389,690
3.	171569,933	147856,404	170033,760	165116,446	170410,646	126712,125
4.	163587,326	110503,452	184488,753	161967,948	160992,596	160950,088
5.	170476,644	163020,332	183783,908	163351,647	166540,078	150213,922
6.	179086,877	124957,496	168800,267	168199,752	157120,697	165156,227
7.	381035,728	131730,073	172472,219	167681,955	168186,942	157377,070
8.	126091,213	176937,555	170647,778	173816,365	174039,880	152047,255
9.	110875,203	208287,541	170172,341	165016,460	169346,553	156892,454
10.	134789,973	206981,077	182950,572	165488,207	168307,911	170247,587
Průměr:	176877,379	169677,285	178129,193	165649,900	165069,278	154443,900
Směrodatná odchylka:	75201,486	40733,923	12602,322	3548,479	6083,464	11690,743
Typ:	MFN A Standart 300					
	30mm 10kN	30mm 20kN	50mm 10kN	50mm 20kN	80mm 10kN	80mm 20kN
1.	169851,830	187036,261	170620,490	155096,460	166820,123	166803,794
2.	178637,158	166619,435	166027,081	156355,607	164980,960	158430,539
3.	173049,723	134718,653	172569,715	158131,074	170387,901	165098,348
4.	138856,145	159582,761	168618,583	164106,174	181569,803	151282,928
5.	166688,871	146387,020	175877,341	166687,246	175263,598	162679,350
6.	174621,526	150227,151	158874,889	140980,845	180798,161	162775,665
7.	182914,000	172910,420	171364,193	148806,162	177604,255	165400,022
8.	163794,826	122554,000	179806,830	151872,136	179798,656	164023,013
9.	141873,341	162121,341	160682,278	157924,133	172369,554	150630,315
10.	174887,746	171717,942	186535,193	156984,640	175896,549	166343,632
Průměr:	166517,517	157387,498	171097,659	155694,447	174548,956	161346,760
Směrodatná odchylka:	14851,796	19256,627	8361,359	7329,661	5782,265	5970,84

Příloha 3: Výsledné zpracované hodnoty modulu pružnosti metodou derivace přímkové části grafu

Typ:	Epsilon Tech 3542					
	10mm 10kN	10mm 20kN	25mm 10kN	25mm 20kN	50mm 10kN	50mm 20kN
1.	29890,160	11033,910	127165,703	122799,316	187904,725	179045,509
2.	39035,272	7637,887	101441,356	115846,141	185436,274	180924,273
3.	27734,958	22414,421	121750,927	123983,177	190760,920	147705,708
4.	29116,136	16994,954	89617,988	117528,814	199700,806	187693,101
5.	32538,747	18485,280	111767,415	118780,987	192358,850	176717,212
6.	24022,083	9554,182	125834,381	128485,150	182732,560	187652,252
7.	37774,850	-2686,406	125597,263	120451,960	204893,726	181354,829
8.	36687,516	19780,360	111888,626	103205,809	202778,863	179455,465
9.	42533,053	8921,428	117901,583	121392,366	205540,864	180367,467
10.	13389,334	4397,655	115766,794	130721,328	193094,263	199652,022
Průměr:	31272,211	11653,367	114873,204	120319,505	194520,185	180056,784
Směrodatná odchylka:	8509,59	7772,517	11927,21	7591,375	8233,919	5970,84
Typ:	MFN A Standart 300					
	30mm 10kN	30mm 20kN	50mm 10kN	50mm 20kN	80mm 10kN	80mm 20kN
1.	117895,041	101855,308	179857,275	174389,854	196167,016	190485,878
2.	126170,344	105431,028	192689,666	176919,123	212664,072	188711,734
3.	123400,206	117196,380	181361,575	159481,102	221061,360	194952,582
4.	117630,208	111172,008	172101,517	173430,540	226685,972	176350,418
5.	99895,454	110488,137	181316,532	180124,349	209472,286	189117,551
6.	114795,208	106147,611	179217,294	165891,969	210754,501	183613,032
7.	123673,316	126876,182	186803,205	171692,771	225368,514	193701,099
8.	118131,780	111061,807	205253,143	178726,178	224608,387	193683,632
9.	120090,827	114120,921	182761,696	180818,562	181149,366	167319,427
10.	87553,120	109964,095	188203,761	177499,082	226954,330	196965,066
Průměr:	114923,550	111431,348	184956,566	173897,353	213488,580	187490,042
Směrodatná odchylka:	8509,59	7772,517	11927,21	7591,375	8233,919	5970,84



Příloha 4: Tabulka kvantilů pro zjištění hodnoty kritické hodnoty t

Kvantily t_{α} náhodné veličiny $St_{/k/}$

$P(t \leq t_{\alpha,k}) = \alpha$

$(1-\alpha/2)$

k	α							
	0,60	0,70	0,80	0,90	0,95	0,975	0,99	0,995
1	,325	,727	1,376	3,078	6,314	12,706	31,831	63,657
2	,289	,617	1,061	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925
3	,277	,584	,978	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841
4	,271	,569	,941	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604
5	,267	,559	,920	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032
6	,265	,553	,906	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707
7	,262	,549	,896	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499
8	,262	,546	,889	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355
9	,261	,543	,883	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250
10	,260	,542	,879	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169
11	,260	,540	,876	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106
12	,259	,539	,873	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055
13	,259	,538	,870	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012
14	,258	,537	,868	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977
15	,258	,536	,866	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947
16	,258	,535	,865	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921
17	,257	,534	,863	1,333	1,740	2,110	2,567	2,921
18	,257	,534	,862	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878
19	,257	,533	,861	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861
20	,257	,533	,860	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845
21	,257	,532	,859	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831
22	,256	,532	,858	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819
23	,256	,532	,858	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807
24	,256	,531	,857	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797
25	,256	,531	,856	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787
26	,256	,531	,856	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779
27	,256	,531	,855	1,314	1,704	2,052	2,473	2,771
28	,256	,530	,855	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763
29	,256	,530	,854	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756
30	,256	,530	,854	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750
40	,255	,529	,851	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704
60	,254	,527	,848	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660
120	,254	,526	,845	1,289	1,658	1,980	2,358	2,617
∞	,253	,524	,842	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 sb. O právu autorském, zejména §60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do její skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum: 24. 5. 2012

.....

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a license for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact, in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date: 24. 5. 2013

.....